

Proyecto Fin de Carrera

Grado en Ingeniería Aeroespacial

Fabricación de una insoladora basada en LEDs

Autor: Daniel Medrano Trujillo

Tutor: Francisco Antonio Perdigones Sánchez

Dep. de Ingeniería Electrónica

Sevilla, 2016



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Aeroespacial

Fabricación de una insoladora basada en LEDs

Autor:

Daniel Medrano Trujillo

Tutor:

Francisco Antonio Perdigones Sánchez

Profesor Ayudante Doctor

Dep. de Ingeniería Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2016

Proyecto Fin de Carrera: Fabricación de una insoladora basada en LEDs

Autor: Daniel Medrano Trujillo

Tutor: Francisco Antonio Perdigones Sánchez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal

A mi familia y amigos

A mis profesores

A mi mismo

Agradecimientos

Sin duda alguna, no podría haberme topado con una mejor persona para que fuese mi tutor durante el proyecto. Fran, muchas gracias de corazón. Día a día me demostrabas interés por que aprendiese y se hiciesen las cosas bien, lo que ha sido crucial para que todo lo que nos planteamos en un principio se haya llevado a cabo. Más contento no puedo estar con los resultados y con lo aprendido, después de muchas horas, los resultados quedan presentes con este documento y un nuevo juguete para el laboratorio.

Gracias también al departamento de Ingeniería Electrónica y en especial a Blas por su paciencia, que lo he aburrido pidiéndole que me imprimiese en 3D las partes de esta insoladora.

Muchas gracias a mi familia por el apoyo que me han aportado en todas las ocasiones que lo he requerido. Sé que a mi padre le gustaría tener una insoladora como esta.

Os hartaréis de mí algunas veces, pero sé que en el fondo me queréis y cuando no tengamos más remedio que no vivir juntos, ya me encargaré yo de que me echéis en falta cuanto menos la mitad que yo lo haré a vosotros. Para mí quedan todas esas experiencias compartidas en la calle Adelantado, la de papelones compartidos quizás algún día se plasmen un libro.

Gracias a Raquel por demostrarme tanto siempre y tirar de mí cuando me hacía realmente falta. Las cosas tienen otro ritmo cuando tú eres la que las mueves.

Daniel

Sevilla, 15 de Julio de 2016

Resumen

Se desarrolla una insoladora de LEDs ultravioleta para la fabricación de PCBs y microestructuras de resina. Este diseño permite fabricar microestructuras de SU-8 inclinadas con gran precisión y detalle. Las partes mecánicas de esta insoladora son fabricadas mediante un software de diseño y una impresora 3D.

Abstract

A UV-LED lithography is developed in order to manufacture of PCBs and high aspect ratio microstructure patterning. This design lets fabricate tilted SU-8 microstructures with high precision and detail. The mechanical parts of this lithography are manufactured with a design software and 3D printer

Índice

Agradecimientos	IX
Resumen	XI
Índice	XVII
1 Introducción y Objetivos	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivos	5
2 Estado del Arte	7
2.1 Insoladoras de sobremesa	7
2.2 Alineadora óptica	8
2.3 Linternas ultravioleta	9
2.4 Situación de la insoladora de este proyecto	10
3 Elección del LED y Resultados Previos	11
3.1 Características de los LEDs elegidos	11
3.1.1 Longitud de onda	11
3.1.2 Ángulo de apertura	12
3.1.3 Modelo de LED seleccionado	13
3.2 Primeras insolaciones	15
3.3 Uso del coat o capucha	18
4 Diseño Electrónico	22
4.1 Diseño de la placa de LEDs	22
4.2 Temporizador y driver	33
5 Diseño Mecánico	39
5.1 Cálculos previos	39
5.1.1 Cálculo de la altura de insolación	39
5.1.2 Cálculo de la huella. Ángulo de insolación nulo	44
5.1.3 Cálculo de la huella con un ángulo de insolación dado	46
5.2 Diseño de las piezas de la insoladora	52
5.2.1 Coat de los LEDs	53
5.2.2 Sistema de control de ángulo de insolación	53
5.2.3 Caja soporte de la insoladora	55
6 Experimentos y pruebas	59
6.1 Insolación de PCB	59
6.2 Insolación de resina SU-8	64
7 Conclusiones y Mejoras Futuras	69
7.1 Conclusiones del proyecto	69
7.2 Mejoras futuras	71
Referencias	73

ANEXO I: Datasheet de los elementos	75
ANEXO II: Presupuesto	82
ANEXO III: Planos de Partes Impresas	87
ANEXO IV: Fotolitos de placas	91
ANEXO V: Códigos de programación	93

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

La fotolitografía es un proceso empleado en la fabricación de dispositivos semiconductores o circuitos integrados, así como microsistemas. El proceso fotolitográfico consiste en transferir un determinado esquema o patrón desde una fotomáscara o fotolito a una superficie plana generalmente denominada oblea. El fotolito no es más que una superficie transparente o traslúcida sobre la se genera una imagen la cual se quiere obtener sobre la oblea en un determinado material.

Este proceso comienza por conseguir una oblea sobre la que se quiera dejar grabado la representación hecha en el fotolito, para que esto sea posible, sobre la oblea debe existir un elemento fotosensible el cual reaccionará ante la exposición a una fuente de radiación lumínica. Después deberá ser tratado conveniente para separar la suficiente resina para que se quede sobre la oblea la imagen de la deseada.

Debido a que en este proceso se incluye una fuente emisora de radiación lumínica, será necesario disponer de un dispositivo capaz de generar dicha radiación así como controlarla para que el proceso sea efectivo.

Es aquí donde emerge la necesidad de la creación de este dispositivo. Normalmente denominado como insoladora es aquel aparato que se compone de una fuente de luz con unas determinadas características para poder tratar la resina depositada sobre las obleas o placas. Generalmente la propiedad más importante de la luz emitida es que está en el rango de luz ultravioleta a una longitud de onda determinada por lo que la superficie fotosensible será activada por dicho tipo de radiación.

Usualmente la fotolitografía es usada para la fabricación de circuitos integrados y microsistemas ya que se parte de una oblea con una fina capa de cobre y luego una capa de resina sobre la misma. Si se quiere obtener las pistas de un determinado circuito, se deberá imprimir dicho esquema sobre el fotolito que se vaya a usar y posteriormente exponerlo a la fuente de luz de una insoladora. Aparte de esta función existen otras; la más especial de esas otras es la creación de microestructuras en resina fotosensible

La figura obtenida en relación con la que está grabada en el fotolito dependerá del tipo de resina que se use en la fabricación. Existen dos tipos diferentes de resina:

- Resina positiva: es aquel tipo de resina cuya reacción a la luz ultravioleta es tal que tras el proceso posterior de tratado, las zonas de resina expuestas a la radiación serán eliminadas quedando el esquema dibujado en el fotolito.
- Resina negativa: es aquel tipo de resina cuya reacción a la luz ultravioleta es tal que tras el proceso posterior de tratado, las zonas de resina expuestas a la radiación permanecen sobre la superficie que las contenía y las zonas con sombra serán eliminadas quedando sobre la oblea la superficie negativa del fotolito.

La figura 1-1 ayudará a la comprensión de los dos tipos de resina existentes. En esta figura se ve lo antes comentado, la oblea con la fotomáscara es expuesta a la luz UV (ultravioleta) y dependiendo del tipo de resina se generará una imagen u otra tras el proceso de revelado. Lo que define el tipo de resina es la base de la composición química de esta.

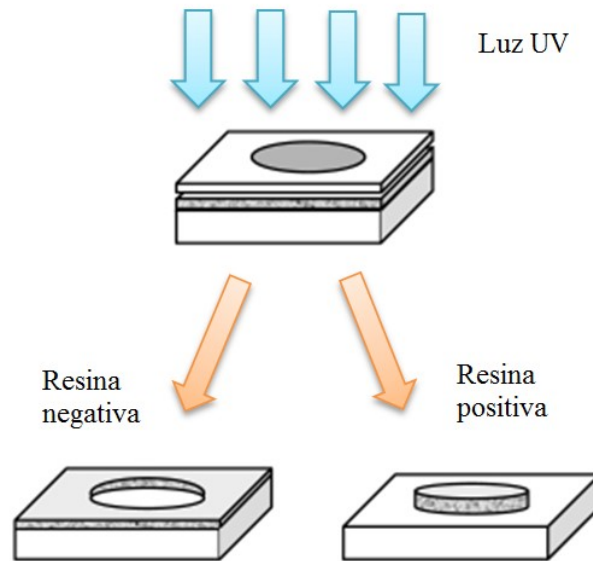


Figura 1-1. Tipos de resina

Las aplicaciones de este proceso son múltiples pero en este caso este proyecto estará centrado en la utilización de la insoladora para la fabricación de PCBs y microestructuras de resina SU-8. Que se definen a continuación.

Los PCBs (Printed Circuit Board) son superficies plásticas (Flame retardant 4 –FR4) con una fina película de cobre que a su vez está cubierta de una resina fotosensible.

Sobre estas superficies se sitúa el fotolito con la imagen que se quiere generar en la placa. Generalmente dicha imagen suele ser el esquema de conexiones de un circuito electrónico.

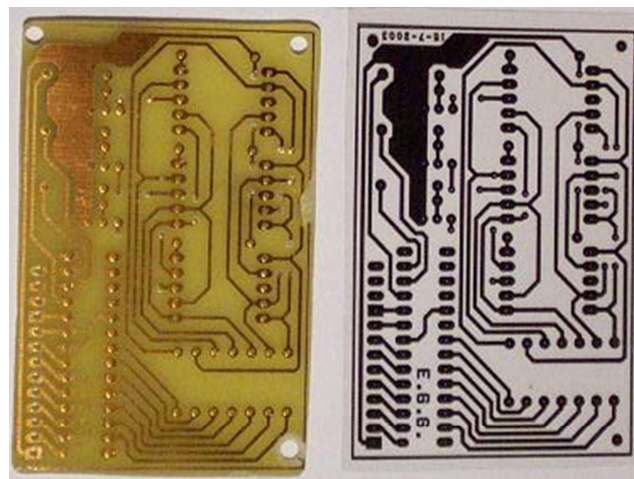


Figura 1-2. PCB y fotolito

Usualmente, la resina depositada sobre la película de cobre es de tipo positiva. Un ejemplo de ello se puede ver en la figura 1-2.

El proceso de fabricación de un PCB está determinado por una serie de pasos.

- Generación del fotolito a partir de un programa de diseño de circuitos integrados o similares.
- Exposición de la placa que contiene el cobre y la resina a la fuente de luz ultravioleta con el posicionamiento del fotolito sobre la resina.
- Revelado del PCB. Se sumerge la placa sobre un líquido revelador que disuelve la resina que ha sido

expuesta a la luz UV de la insoladora quedando tan solo las zonas de sombra. Esta sustancia está formada en su mayor parte por sosa caustica. Después de este proceso, quedarán visibles la superficie de cobre de la placa.

- Atacado del PCB. Este es otro tipo de sustancia que esta vez disuelve esta vez el cobre pero no la resina. Después del proceso de revelado, quedan desprotegidas las zonas de cobre en las cuales ha incidido la luz UV por lo que al aplicar este agente atacador serán disueltas quedando tan solo las superficies de cobre que están cubiertas por resina. La composición de esta sustancia generalmente es una parte de agua oxigenada, una parte de aguafuerte y dos partes de agua.

Finalmente, el resultado son las pistas de cobre dibujadas sobre el fotolito. Estas pistas aún mantendrán una capa de resina la cual es disuelta con acetona, para que así se pueda trabajar directamente sobre el cobre y se haga una correcta conexión de los elementos en el soldado de los mismos.

La resina SU-8 es una fotorresina epoxy negativa con unas propiedades mecánicas y químicas aceptables y biocompatibles. En este caso, el uso de esta resina en el proyecto estará centrado en la fabricación de microestructuras a partir de ella. Existen muchos tipos de resina, pero las usadas para dicha fabricación han sido la del tipo 2005 y 2050. El proceso de fabricación de microestructuras con resina del tipo SU-8 es diferente al del PCB.

- Deposición: sobre una oblea con superficie perfectamente lisa se deposita una cantidad determinada de SU-8.
- Spin Coating: Es el proceso por el cual se extiende la resina depositada sobre la superficie de la oblea. Consiste en posicionar dicha oblea dentro de una máquina denominada Spin Coater. Esta máquina se compone de una superficie conectada a un eje de giro que se moverá a una determinada velocidad de giro. La oblea queda anclada a esa zona debido a que se realiza el vacío entre ambas. El espesor de la capa de resina vendrá determinado por la velocidad de giro del Spin Coater.
- Softbake: después de obtener la capa de SU-8 sobre la placa, se calienta para eliminar el disolvente presente en la resina. Dicho calentamiento es hecho en una máquina llamada Hotplate. El tiempo y temperatura de este proceso vendrá determinado por el tipo de resina que se esté utilizando, así como el espesor que se haya definido.
- Exposición. Esta parte es en la que entra en juego la insoladora. Se sitúa sobre la resina el fotolito que previamente se ha generado. Se ha de tener en cuenta que este tipo de resina es negativa y quedará por tanto el negativo de la imagen representada en la fotomáscara. Después de esto, se expone la oblea a la fuente lumínica de la insoladora y se empieza a irradiar con luz ultravioleta. Los tiempos de exposición dependerán del espesor de la capa de resina así como de la potencia por unidad de superficie de la insoladora.
- PEB: Post Exposure Bake. Se vuelve a calentar la oblea con el fin de polimerizar el SU-8 iluminado. De nuevo, los tiempos y temperaturas son determinados por el proveedor de la resina.
- Grabado: con el objetivo de eliminar la resina no polimerizada, se trata la oblea con un tipo de disolvente. Posteriormente se suele aclarar con isopropanol los restos que hayan quedado.

Después de este proceso, el resultado obtenido es del tipo de la figura 1-3

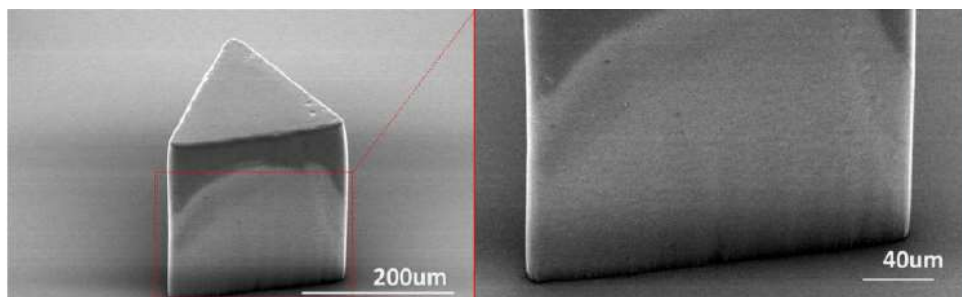


Figura 1-3. Microestructura de SU-8

El alcance de este proyecto incluirá desarrollar un aparato para usarlo en los dos procesos de fabricación antes descritos pero con una importante modificación: La posibilidad de generar microestructuras de resina con un ángulo dado. Esta mejora implica que se insola con un ángulo específico y se generarán estructuras como las que se pueden ver en la figura 1-4

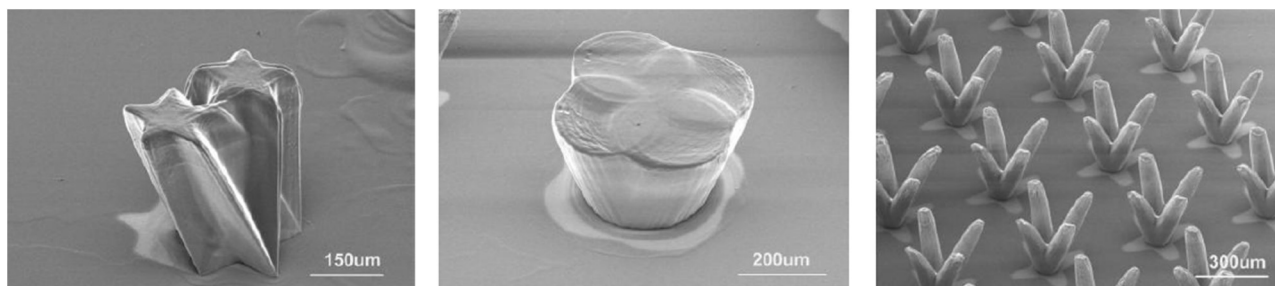


Figura 1-4. Microestructuras con ángulo de SU-8

Algunas de las aplicaciones de insolar esta resina de forma inclinada son la fabricación de filtros de fibra óptica como el que se puede ver en la figura 1-5 o estructuras malladas como la de la figura 1-6

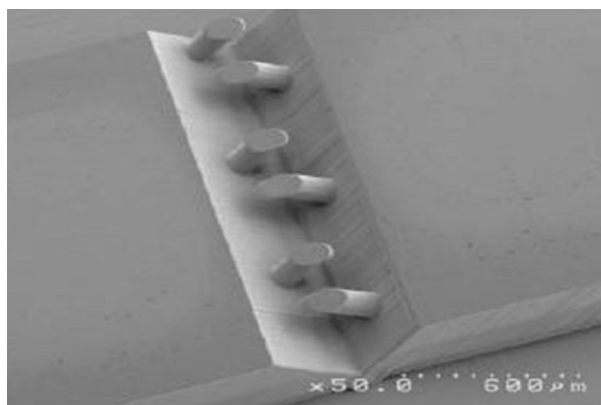


Figura 1-5. Filtro de fibra óptica

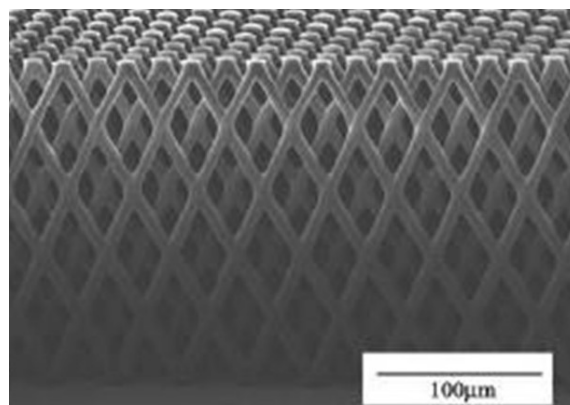


Figura 1-6. Malla hecha en SU-8

Debido a esto, el diseño de la insoladora incrementará la complejidad ya que será necesario un sistema para controlar el ángulo con el que se insola y poder determinar la forma que va a tener la microestructura.

Todo el proyecto estará muy influenciado por un artículo de investigación, el cual se puede ver en la Referencia [1]. De este artículo se usarán importantes resultados e ideas que servirán como base para el desarrollo de la insoladora especialmente para la configuración de la placa de emisora de luz ultravioleta, la cual será la pieza más importante del sistema ya que es la que le dará la funcionalidad requerida.

Todos los elementos anexos a la fuente de luz servirán como soporte y sistema de control de la misma. Los sistemas más destacables son el sistema de control de tiempo de insolación y el sistema de control del ángulo de insolación.

Puesto que el tiempo es una variable importante en el proceso de fabricación de PCBs y microestructuras en resina, será necesario controlar el tiempo que la insoladora está radiando luz, por lo que se ha generado un sistema para ello.

Como se ha comentado antes, se pretende conseguir una máquina capaz de generar microestructuras de resina inclinadas, para ello será necesario un sistema de control para poder imponer el ángulo requerido entre la fuente de luz y la superficie de la resina.

Aparte de estos dos elementos, serán desarrollado varios más principalmente como soporte de los otros sistemas. Estos elementos serán diseñados específicamente para la insoladora de este proyecto y serán conformados en plástico gracias a la impresión 3D.

El documento estará estructurado en varios capítulos claramente diferenciados. Los capítulos serán divididos en los diferentes procesos de diseño seguidos. Comenzando por definir y experimentar con la tecnología escogida para la fuente emisora de luz UV, luego se pasará al diseño y fabricación de dicha fuente así como el circuito electrónico del sistema temporizador.

El próximo paso será el que comprenderá el diseño que se ha definido como mecánico, y está referido al desarrollo de los elementos adyacentes a la fuente de luz y al temporizador.

Finalmente se dedicará un capítulo para los experimentos llevados a cabo con la insoladora que se ha fabricado destacando los aspectos más importantes de la misma.

Se terminará el presente documento con un análisis de las conclusiones obtenidas y unas propuestas de mejoras futuras para el diseño que se ha conseguido.

1.2 Objetivos

En este apartado se definen más específicamente los objetivos marcados para este proyecto, concretando así las propiedades que tendrá la insoladora.

Estos objetivos se diferenciarán en 2 tipos: el objetivo principal y los objetivos secundarios.

- **Objetivo principal: Funcionalidad**

El objetivo principal de este proyecto es generar una máquina capaz de insolar con gran precisión, especialmente enfocada en la fabricación de microestructuras de resina SU-8 consiguiendo así una alternativa a las alineadoras convencionales. La fabricación de PCBs requiere menos dificultades que la de insulación de resina, por lo que si se llega a la meta de fabricación de microestructuras, se habrá alcanzado de sobra la capacidad de conseguir circuitos impresos.

Los objetivos secundarios serán los que definan más en detalle este proyecto. Estos objetivos son:

- **Generación de microestructuras inclinadas:** Derivado del objetivo principal, un valor añadido al diseño sería que fuese capaz de generar microestructuras con un cierto ángulo dándole una funcionalidad extra que sería una ventaja en comparación con las insoladoras convencionales o alineadoras.
- **Bajo coste:** Una característica importante, generar grandes proyectos con un gran presupuesto es sencillo, pero cumplir una serie de requisitos intentando abaratar costes en la medida de lo posible será otro punto de valor añadido a esta insoladora. Se usará por tanto tecnología de bajo coste pero que sirva para alcanzar los objetivos propuestos.
- **Eficiencia:** Conseguir un sistema eficiente siempre es una gran ventaja. Esta eficiencia estará especialmente enfocada a la cantidad de potencia eléctrica que la insoladora consuma para su funcionamiento en condiciones normales. Mientras menor sea, mayor valor tendrá este diseño. Por lo que sería conveniente usar tecnología de bajo consumo eléctrico para el desarrollo de este proyecto.
- **Estética:** otra de las características que podría hacer que se diferenciase de los otros tipos de insoladoras del mercado sería que cambiase radicalmente la forma cuidando la estética y yendo más lejos en los detalles. Para ello se podría usar materiales no convencionales en la fabricación de este aparato.

Una vez cumplido el objetivo principal de la funcionalidad, mientras más objetivos secundarios se cumplan,

más valor tendrá el diseño que se haga. Dentro de los secundarios, el que más importancia tiene es otro objetivo funcional: el de generación de microestructuras inclinadas. Será un punto bastante fuerte de la insoladora que le daría una característica que la diferenciaría del resto y otorgaría más potencia a la hora de generación de formas con resina.

Después de este objetivo, en segundo lugar estaría el de un diseño económico, mientras mayor relación calidad precio se consiga con el producto final, mayor puntuación tendrá el diseño.

En cuanto a la eficiencia económica, es un aspecto a tener siempre en cuenta cuando se trata de un desarrollo electrónico pero ocupará un lugar por debajo de los otros dos objetivos ya que lo primordial es que la insoladora sea funcional y económica.

En último lugar, puesto que se pretende la construcción del sistema completo de la insoladora, nunca está de más cuidar los detalles visuales del hardware por lo que se tendrá en cuenta el objetivo de conseguir un diseño de una estética elevada pero siempre y cuando se hayan cumplido los otros anteriormente por lo que este será el menos importante de todos.

En resumen, lo que se pretende conseguir es una insoladora de gran potencia y bajo coste con la funcionalidad de insolación en ángulo que sea capaz de generar microestructuras de resina y microcircuitos en cobre con una precisión parecida a la de una alineadora.

Para ello está desarrollado este proyecto el cual está descrito en su mayor parte en el resto del presente documento el cual explicará por bloques la solución obtenida para cumplir los objetivos marcados.

2 ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se comentará los tipos de insoladoras que existen actualmente en el mercado y se definirá qué lugar ocupa el tipo de insoladora que se va a desarrollar en el proyecto.

Existen multitud de tipos y modelos pero se pueden dividir en dos grupos dependiendo de sus parámetros más generales y funciones. A continuación se explicarán los tipos más generales existentes así como sus características que los hacen diferentes unos de otros.

2.1 Insoladoras de sobremesa

Este tipo de insoladoras puede que sea la más común. Para generar la radiación ultravioleta utilizan lámparas que produzcan este tipo de luz, como puede ser el arco voltaico, vapor de mercurio, metal halógeno o tubos fluorescentes.

El arco voltaico está en desuso debido a la producción de humos contaminantes que obliga a tener un extractor instalado cerca de la insoladora, aparte de que existe una alta dificultad a la hora de cambiar los carbones que utiliza.

Si se utiliza vapor de mercurio, son necesarias varias lámparas para conseguir una iluminación uniforme, aparte de tiempo de precalentamiento y de enfriamiento que necesitan para funcionar.

El tipo de lámpara más utilizada en esta clase de insoladoras son las de lámparas halógenas, la cual producen con una sola lámpara una luz de gran intensidad y uniforme con un alto índice de radiación ultravioleta por lo que reduce los tiempos necesarios de exposición para conseguir un determinado resultado.

Una alternativa a estas lámparas halógenas es sustituirlas por tubos fluorescentes. Son una alternativa económica, pero a cambio de tener que usar una mayor cantidad de ellos. Una desventaja de los tubos fluorescentes son las fluctuaciones lumínicas que producen, generando una luz difusa y con oscilaciones, esto puede llegar a ser un problema a la hora de tratar con la resina.



Figura 2-1. Insoladora de tubos fluorescentes

Por lo general presentan la forma de la figura 2-1; una especie maleta de sobremesa con una superficie para apoyar el material a insolar y lámparas de ultravioleta situadas a su alrededor para generar la radiación.

Pueden servir para insolar en dos caras a la vez, en el caso de que tengan lámparas arriba y debajo de la superficie de apoyo.

Suelen tener múltiples usos, desde la serigrafía de prendas hasta la fabricación de PCBs; no están recomendadas para insolar resina debido principalmente a la calidad de la luz que desprenden y a la poca precisión con lo que lo hacen. Las microestructuras generadas tendrían poca resolución.

Como ventaja comentar el gran tamaño que pueden alcanzar de forma sencilla.

Algunos de los sistemas que suelen traer instalados pueden ser una bomba de vacío y un temporizador.

La bomba de vacío sirve para que el fotolito y el material fotosensible queden estrechamente unidos y en contacto en el momento de la insolación. Puede verse en la imagen 2-1 que sobre el cristal que está horizontal se situaría la oblea con el fotolito (en las dos caras si es necesario) y sobre estos recaería la otra superficie transparente que es la que permitiría hacer el vacío entre ella y la de abajo.

Por otro lado, el uso del temporizador es el común, controlar los tiempos máximos de insolación ya que es un parámetro importante del proceso.

La superficie de insolación es bastante elevada, debido a la simplicidad del diseño y los componentes que lleva, se pueden fabricar de un mayor tamaño fácilmente. Esta gran superficie de irradiación es la que le da versatilidad a este modelo para imprimir desde tamaños pequeños de PCB hasta grandes placas, extendiéndose su uso también en la serigrafía de prendas.

Debido a que las fuentes de luz son las que se han explicado anteriormente, con este tipo de insoladoras se tiene un bajo índice de colimación de los rayos ultravioletas, es decir, los rayos no son paralelos entre sí, sino que tienen direcciones dispersas lo que provoca la pérdida de precisión en la insolación y por tanto en la resolución de los resultados obtenidos.

El precio suele oscilar entre las 3 cifras o las 4 cifras de euros, dependiendo de la complejidad del aparato, el tamaño y de los sistemas que integre. También existen modelos industriales que incrementan aún más su tamaño y potencia y por lo tanto el precio.

2.2 Alineadora óptica

Esta máquina sirve principalmente para la fabricación de PCBs en los que se requiere una gran precisión. La producción de MEMS (Microelectromechanical Systems), LEDs (Light Emitting Diode), chips y circuitos integrados requiere alta precisión en el alineamiento de la máscara para las obleas en sistemas de nanolitografía o microlitografía por exposición ultravioleta.



Figura 2-2. Alineadora óptica

Con una calidad de impresión de $1\ \mu\text{m}$ o menos, esta máquina es capaz de obtener toda clase de circuitos integrados en una reducida superficie pero con gran calidad de las conexiones. Esta gran precisión es conseguida debido a que los rayos lumínicos que emite la fuente tienen una gran colimación por lo que gracias a esto se tiene tanta precisión.

Las universidades y centros de investigación suelen ser el mercado en el que encaja este tipo de máquinas ya que puede dar solución a ocasiones en las que se requiera producir microcircuitos pero a unos bajos niveles de producción con una gran precisión y fiabilidad para sus aplicaciones en nanolitografía.

Una de las aplicaciones más importantes que permite este tipo de máquinas es la fabricación de microestructuras, debido a su alta resolución de impresión, se pueden generar multitud de formas complejas a partir de la fuente de luz ultravioleta que utiliza. Estas microestructuras podrán estar constituidas de silicio, vidrio u, cobre otros materiales, donde el proceso es el mismo y sólo cambiaría la máscara y la composición de la oblea.

La insoladora de este proyecto estará especialmente enfocada en la microfabricación de resina SU-8, pero con la ventaja de la insolación en ángulo, lo que haría que se diferenciase de las alineadoras que por lo general, no realizan esta función.

Un sistema de alineamiento entre fotomáscara y oblea a la vez que un sistema de emisión de radiación ultravioleta son los más importantes de esta máquina.

Aparte, generalmente incluye los sistemas de fijado de la oblea y el fotolito como puede ser la bomba de vacío o el sistema de control de tiempo, el cual será más complejo que para el caso del anterior subapartado.

También puede traer instalado un sistema anti vibraciones que aumentaría aún más la precisión de la insolación y por tanto, el de los resultados obtenidos.

El tamaño de la superficie que irradia es menor que en el caso de las insoladoras de tubos de fluorescentes, ya que la función de esta máquina está especialmente enfocada para la fabricación de circuitos en pequeñas superficies por lo que ambos aparatos tienen aquí su gran diferencia.

La creciente utilización de microsistemas y nanosistemas le dan especial importancia a este tipo de máquinas. El precio es bastante más elevado que en comparación con el otro tipo, pero aun así existe un amplio rango de precios para una alineadora, yendo desde las 5 cifras de euros hasta las 6 debido a la complejidad que la constituye y que permite desarrollar su función. Los modelos industriales para grandes volúmenes de producción vuelven a estar ampliamente diferenciados en comparación con los que suelen tener los laboratorios de investigación.

2.3 Linternas ultravioleta

Otro tipo de fuente de luz ultravioleta pueden ser las linternas que incorporan lámparas capaces de emitir en este espectro.

No pueden considerarse insoladoras como tal ya que no tienen los aspectos típicos de las mismas. No están enfocadas para las mismas funciones que los dos tipos anteriores aunque si son capaces de insolar superficies debido que emiten dentro del espectro ultravioleta.

La forma típica de estas linternas suelen ser como las de la figura 2-3. Donde la linterna de la izquierda está compuesta por un tubo parecido al fluorescente, mientras que la otra funciona con LEDs ultravioletas.



Figura 2-3. Linternas ultravioleta

La ventaja principal que presenta es gracias a su gran movilidad. Esto es derivado del uso de baterías por lo que no necesitan. Esto a su vez es lo que lo hace diferente de una insoladora ya que carecen de un soporte estructural para insolar a una distancia dada, por lo que no se puede controlar correctamente la proximidad de la fuente de UV a la superficie receptora dificultando así la insolación.

Están diseñadas para iluminar áreas concretas, por lo que usan ángulos grandes de apertura de la luz, lo que hace que no se tenga una colimación buena. Esta característica trae consigo una apreciable falta de precisión que hace inviable este tipo de fuente ultravioleta para la microfabricación.

Además, carecen de otros sistemas, entre ellos está un sistema de control de tiempo lo que era una función común de los dos tipos anteriores, en las linternas de luz ultravioleta no se integra tal función.

El precio de estas linternas es más bajo que el de una insoladora de sobremesa, e incomparablemente inferior al de una alineadora.

2.4 Situación de la insoladora de este proyecto

En comparación con los tipos de fuentes de luz UV, la del presente proyecto será bastante diferente a ellas pero compartiendo algunas características.

Sería conveniente que dicha insoladora fuese práctica y funcional, es decir, que sea capaz de generar tanto PCBs como microestructuras de SU-8. Por lo tanto debe tener la característica de tener una gran precisión en la insolación como la tienen las alineadoras. Así que no será recomendable usar la tecnología de iluminación que utilizan las insoladoras convencionales de tubos fluorescentes, para evitar una falta de colimación de los rayos y que se generen microestructuras con paredes definidas correctamente.

En cuanto al tamaño, tiene que diferenciarse de las alineadoras ya que tienen un gran volumen a pesar de que los microcircuitos que fabrica sean de un tamaño reducido. Por eso, debería asemejarse a las del otro tipo, pero sin llegar a tener una gran superficie de insolación ya que tampoco es requerida en este proyecto y podría incrementar las dificultades técnicas. No se buscará obtener un elemento portátil como el caso de las linternas ya que se diseñará una estructura que fije la fuente lumínica.

En resumen, la insoladora de este proyecto puede estar ubicada en el mercado como una alternativa a las alineadoras en cuanto a simpleza, tamaño y costes pero con grandes funcionalidades como la generación de microestructuras de gran calidad. Aparte llevará el valor añadido de poder insolar con un ángulo definido y que será económica y eficiente.

3 ELECCIÓN DEL LED Y RESULTADOS PREVIOS

Después de esta introducción a las insoladoras y del fijado de los objetivos que se iban a intentar cumplir en la que se va a desarrollar para este proyecto, tocaba elegir lo más importante:

Qué tipo de tecnología se iba a usar para fabricar la fuente de luz ultravioleta.

La respuesta está en los LEDs. Este tipo de diodo emisor de luz, en este caso UV, permiten cumplir varios de los aspectos que se han propuesto para la insoladora:

- Funcionales: está demostrado que son capaces de insolar superficies, por lo que se debería de conseguir el objetivo principal del proyecto usándolos. Además, el valor de colimación de los rayos que emiten permitirá alcanzar la precisión y calidad del haz de luz que emiten debido a los bajos ángulos de apertura que tienen los LEDs por lo general.
- Económicos: Son una tecnología de un bajo coste relativo en comparación con otras fuentes lumínicas de radiación UV.
- Eficientes: el consumo es mínimo, la potencia de la insoladora será muy baja gracias a ellos.

El mercado ofrece gran variedad de tipos de LEDs UV, es por parte del proyecto escoger cual es el modelo que permite ajustarse más a los objetivos propuestos.

Se describe el modelo del LED escogido para la insoladora así como algunos experimentos llevados a cabo para probar la eficacia de los mismos en cuanto a la fabricación de PCBs y resina SU-8.

3.1 Características de los LEDs elegidos

La matriz de LEDs es el componente más importante de este aparato, es la que le da su función y por lo tanto, en la que más se requiere invertir el tiempo para que la máquina completa funcione perfectamente.

Esta matriz, estará compuesta de 100 LEDs convencionales que emitan radiación ultravioleta en una determinada longitud de onda. La cantidad de diodos que se montarán en la placa es fijada como uno de los requisitos de diseño del proyecto.

El mercado ofrece un amplio rango de variedades de diodos de emisión de luz UV, por eso se ha hecho un estudio de los requisitos que un LED debe de tener para que cumpla con las exigencias propuestas y pueda ser usado para la insoladora.

Para ver qué tipo de LED será el elegido para el proyecto, se hará una selección referenciada en el artículo de la Referencia [1] y se intentará conseguir un diodo lo más similar posible al usado en él. Para ello se tendrán en cuenta varios parámetros:

3.1.1 Longitud de onda

La radiación ultravioleta es la radiación electromagnética cuya longitud de onda está comprendida aproximadamente entre los 400 nm (4×10^{-7} m) y los 15 nm ($1,5 \times 10^{-8}$ m) quedando por debajo del espectro de luz visible. Dentro de este rango, existen varias clasificaciones según la longitud de onda:

Tabla 3-1. Tipos de rayos ultravioletas

Nombre	Longitud de onda (nm)
Ultravioleta A (onda larga)	400 – 315
Ultravioleta B (onda media)	315 – 280
Ultravioleta C (onda corta)	280 – 100
Ultravioleta cercano (near)	400 – 300
Ultravioleta medio (middle)	300 – 200
Ultravioleta lejano (far)	200 – 122
Línea Lyman-alpha	122 – 121

Las lámparas LEDs UV comerciales emiten con los valores de longitud de onda de pico mayores, es decir, las del tipo A y B. Comparando distintos modelos se aprecia que el LED convencional suele tener esta magnitud comprendida entre los 400 y 375 nm. En el artículo que se ha usado como referencia, utiliza un tipo de LED con una longitud de onda de pico de 380 nm. Por eso es conveniente seleccionar los diodos que emitan con este valor, ya que en la Referencia [1] queda más que demostrado que con este valor de longitud de onda se consiguen los objetivos de fabricación de PCBs o microfabricación de estructuras. Por lo tanto, con esto se fija un parámetro de los LEDs que se van a usar:

Longitud de onda: 380 nm

3.1.2 Ángulo de apertura

Las lámparas de luz, emiten dicha luz en unas determinadas direcciones, las cuales forman un cono de iluminación determinado. El cono de cada lámpara tiene un determinado ángulo, lo que permite determinar las áreas que podrá iluminar y las que no.

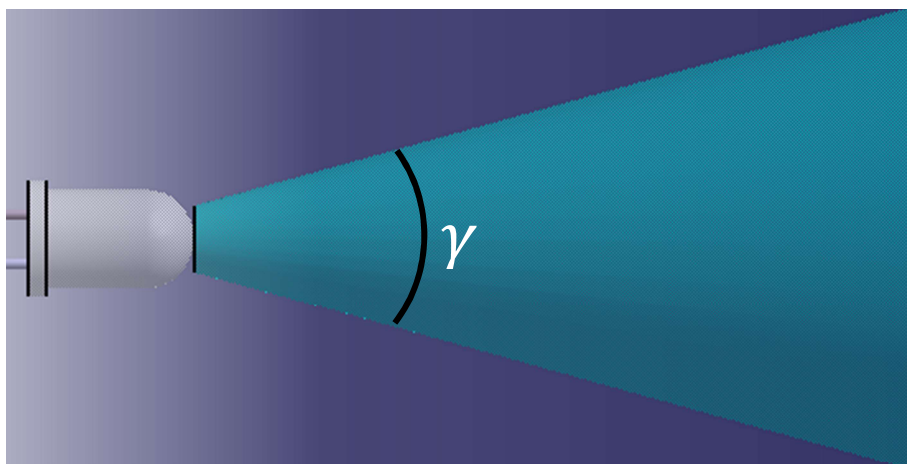


Figura 3-1. Ángulo de apertura de un LED

Este ángulo se corresponde con la zona donde se concentra el mayor porcentaje de la luz que emite el LED en este caso (50-90% de la luz emitida). En el resto de áreas no comprendidas en este cono, se producen pérdidas lumínicas. Este dato es proporcionado por el fabricante del componente.

Las lámparas LED tienen la característica de que son muy focales, es decir, el ángulo de apertura no suele ser excesivamente grande, lo que implica desventajas en ciertos casos (por ejemplo, a la hora de usarlas para

iluminar una habitación). En este caso, es una ventaja ya que permite concentrar la luz en un área más pequeña, lo que hace que se alcancen valores de potencia lumínica más elevados. Además, la colimación del haz de luz emitido será superior mientras menor sea el valor del ángulo de apertura lo que permitirá insolar con una mayor precisión.

Además, mientras mayor sea la potencia lumínica, mayor será la radiación UV, lo que implica que la superficie fotosensible recibirá más radiación, por lo tanto, lo que se busca es una lámpara LED con un ángulo de apertura lo más pequeño posible. De nuevo, se usa como referencia el artículo de la Referencia [1] el cual usa un ángulo de visión del LED de 15° , entonces se buscará una lámpara de similares características.

Ángulo de apertura: 15°

Otros parámetros que vienen referenciados en la Referencia [1] son las dimensiones del LED: 5 mm o la corriente de funcionamiento del mismo: 20 mA . Se intentará buscar los valores más próximos posibles de estos parámetros para poder así usar varios de los resultados obtenidos en dicho artículo como base para este desarrollo.

3.1.3 Modelo de LED seleccionado

Finalmente, después de investigar y contrastar varios proveedores electrónicos, se ha hecho una elección del modelo del LED que se va a utilizar, el cual es el siguiente:



Tabla 3-2 Características del LED

<i>Referencia</i>	<i>VAOL-5EUV8T4</i>
<i>Longitud de onda de pico</i>	<i>385 nm</i>
<i>Ángulo de apertura</i>	<i>15°</i>
<i>Diámetro de la bóveda</i>	<i>5mm</i>
<i>Tensión máxima</i>	<i>3.6V</i>
<i>Corriente típica</i>	<i>20 mA</i>

Figura 3-2. LED seleccionado

Este es el tipo de LED adquirido para la insoladora, el cual se ajusta bastante a lo buscado y dista poco con el usado en los experimentos del artículo que se usa de referencia.

El datasheet de dicho elemento está incluido en el Anexo [1] y describe todas las especificaciones de este modelo de lámpara LED. De este documento se obtienen importantes gráficas que aportan información del comportamiento del dispositivo.

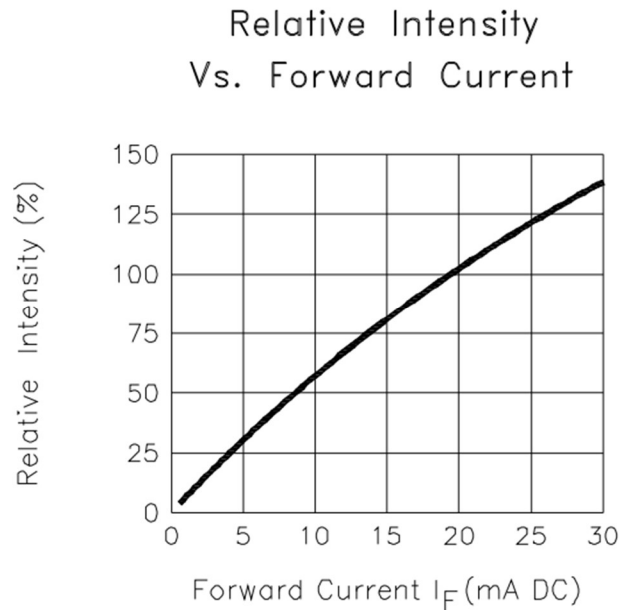


Figura 3-3. Intensidad relativa

Con esta gráfica se puede ver que la corriente normal de funcionamiento es de unos 20 mA, es lo que el fabricante determina que la intensidad relativa es del 100%. Esta intensidad es alcanzada con una tensión de 3V. Este valor sirve para comprender las siguientes dos gráficas:

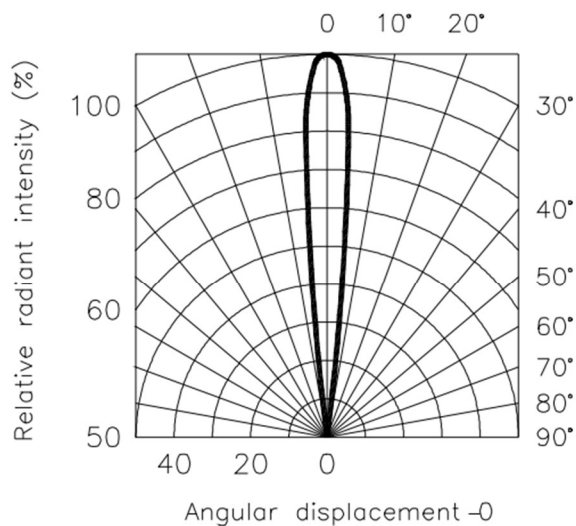


Figura 3-4. Ángulo de apertura

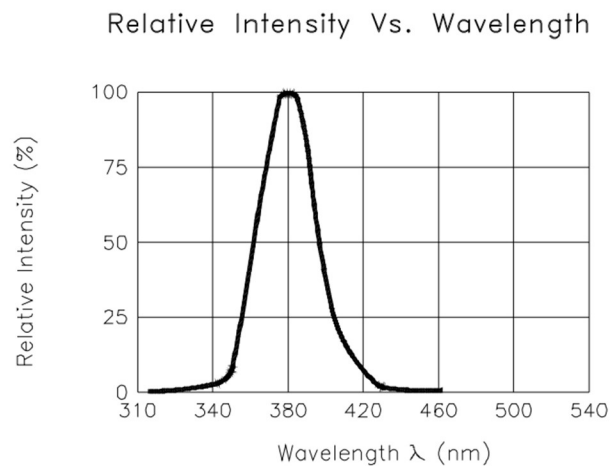


Figura 3-5. Longitud de onda

En la figura 3.4 se ve que el ángulo de apertura es más acusado mientras mayor es la corriente hasta llegar al valor de 100% de intensidad relativa, donde el ángulo es justamente 15°. Luego está la figura de la derecha, donde la longitud de onda de la luz UV emitida por el LED oscila entre dos valores dependiendo nuevamente del valor de la intensidad relativa hasta llegar al valor del 100% donde el rango de valores es muy pequeño y centrado en 380 nm.

Demostrado queda, que el modelo de LED escogido se ajusta perfectamente a las exigencias del diseño de la insoladora. Permitirá cumplir los objetivos:

- ✓ Son capaces de alcanzar una longitud de onda que permite la insolación de resina SU-8 y por tanto de PCBs, según la referencia [1]
- ✓ El precio es reducido, menos de media unidad de euro por cada lámpara. Los detalles económicos estarán recogidos por el anexo que trata del Presupuesto de fabricación de la insoladora.
- ✓ Su punto normal de funcionamiento es de 3 V con 20 mA lo que hace que cada LED tenga un consumo de potencia de $P = V \cdot I = 0.06 \text{ W}$ el cual es bastante reducido.

El siguiente paso fue probar la tecnología adquirida y eso queda recogido en el siguiente apartado.

3.2 Primeras insolaciones

Lo primero que se hizo nada más recibir el pedido de los LEDs fue probarlos para confirmar el funcionamiento correcto, como se tenía previsto, y seguir avanzando en el proyecto.

Mirando de nuevo el datasheet del LED, unos datos importantes deben ser comentados:

Tabla 3–3. Tensión del LED

	Min	Típica	Máx.
Tensión (V)	2.8	3.0	3.6

El fabricante indica que la tensión de funcionamiento típica de los LEDs son 3V, la mínima a partir de la que empieza a emitir luz ronda los 2.8V mientras que la máxima tensión que uno de estos elementos es capaz de soportar sin fundirse son 3.6V.

Son valores son muy próximos entre sí, lo que hace que se convierta en un dispositivo delicado frente a variaciones de tensiones. Cualquier pico de tensión por encima de 3.6V podría suponer que el LED se funda. Esto sería si se tuviera uno conectado; en el peor de los casos, se tendría la instalación completa de la matriz de 100 LEDs conectados en paralelo lo que si hace sobrepasar la tensión máxima del LED implica que toda la matriz se fundiría y eso sería un acontecimiento fatal para el desarrollo del trabajo.

Por esto, se toma la idea de usar resistencias conectadas con los LEDs de modo que se consiga un circuito muy estable frente a las variaciones de tensión, ya que los diodos siempre van conducir a una tensión próxima a los 3V, como indica el fabricante. Esta idea era crucial, sobre todo en las fases previas del desarrollo de la placa, para asegurar que la integridad de los LEDs iba a estar lo más completa posible y que no se iban a desechar muchas unidades de los mismos con los experimentos y pruebas previas.

Sabiendo esto, se comenzó a pensar cual podría ser la configuración más correcta de la placa que contendría la matriz de LEDs. Para ello, se tendría que fijar la relación existente entre los LEDs y las resistencias, así como las proporciones de los mismos.

Una idea estaba fijada de antemano, se decidió que todos los LEDs iban a estar conectados en paralelo. Con esto se conseguía una mayor robustez en el circuito; en el caso de que un LED dejase de funcionar, sólo esa unidad se vería afectada mientras que el resto seguiría funcionando en condiciones normales y sólo habría que cambiar un único elemento por otro nuevo, en el caso de que se haya fundido. Si el LED no fuese el problema, sólo habría que investigar y comprobar el correcto funcionamiento de la zona de la placa a la que esta unidad estaba conectada.

Con base en las ideas de conectar los diodos en paralelo y con resistencias, se montaron los primeros LEDs para empezar a probar que efectivamente, funcionaría la insoladora tal y como la teoría dicta. Se decidió improvisar un circuito rápidamente, sin hacer muchos cálculos previos ya que sólo se trataba de probar su funcionalidad, para ello se usaron 8 LEDs y 8 resistencias en serie con cada uno de los LEDs.

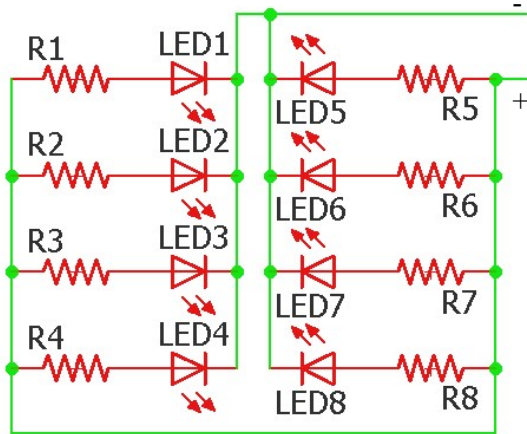


Figura 3-6. Circuito 8 LEDs, 8 resistencias

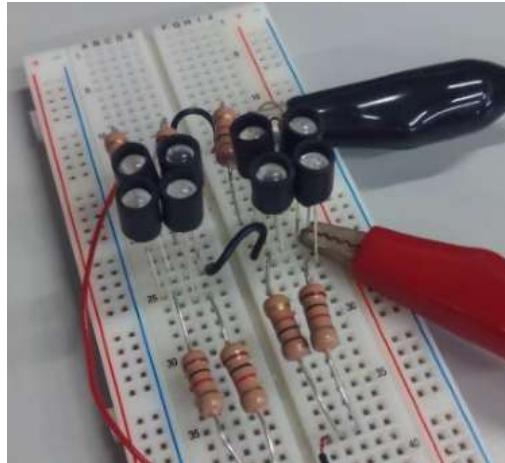


Figura 3-7. Montaje circuito

Para este montaje, se usaron resistencias de $1K\Omega$, y de $0.5W$, lo que hacía que cada rama del circuito, estuviese conectado a la siguiente tensión:

$$V_C = V_{LED} + V_R = 3V + 0.02A \cdot 1000\Omega = 23V$$

Es decir, la placa de prueba montada tenía que estar alimentada con $23V$ y con una corriente de

$$I = 8 \cdot 20mA = 0.16A$$

Ya que 20 mA es la intensidad que se alcanza con 3 V , como ya se comentó en el subapartado anterior.

Los cilindros negros que recubren los LEDs en la figura 3-7, serán comentados en el siguiente subapartado.

Con esto, ya se podría hacer la primera prueba de insolación. Se usó la configuración de en la figura 3-8.

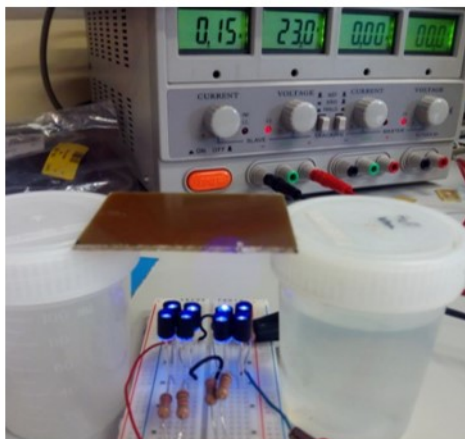


Figura 3-8. Primer montaje

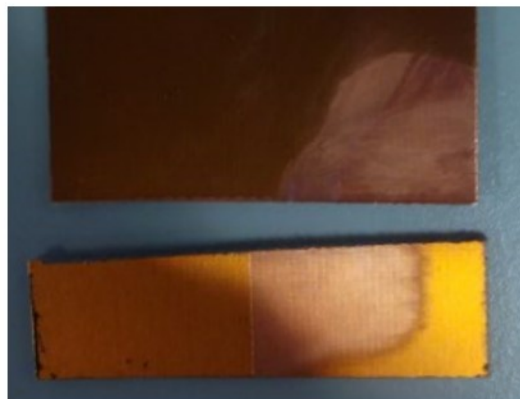


Figura 3-9. Dos PCBs revelados

A una altura aproximada entre 3 cm, y con la tensión e intensidad calculadas, se hicieron varias insolaciones en pequeños PCBs para ver que los LEDs funcionaban correctamente y eran capaz de insolar. Después de exponer la superficie fotosensible un determinado tiempo, se reveló y se comprobaba que efectivamente, la superficie quedaba insolada. La forma poco regular de la zona insolada es debida a que el montaje no seguía unas reglas específicas, sino que era un poco aleatorio.

Una vez fijado el tipo de fuente de radiación (es decir, el LED), el proceso de insolación dependería de dos factores principalmente: altura de insolación y tiempo. En otras palabras, la distancia entre LED y la placa, y el tiempo que la resina del PCB estuviese expuesta a la luz UV. Por ese motivo, se realizó otro pequeño experimento.

Con la altura fijada, se procedió a insolar una serie de placas de PCB de modo que la única variable que iba a ser modificada entre una insolación y otra era el tiempo que los LEDs iban a estar conectados. El tiempo iba a variar entre 8 minutos y 15 segundos. Después de ser reveladas, el resultado fue el que se ve en la figura 3-10.

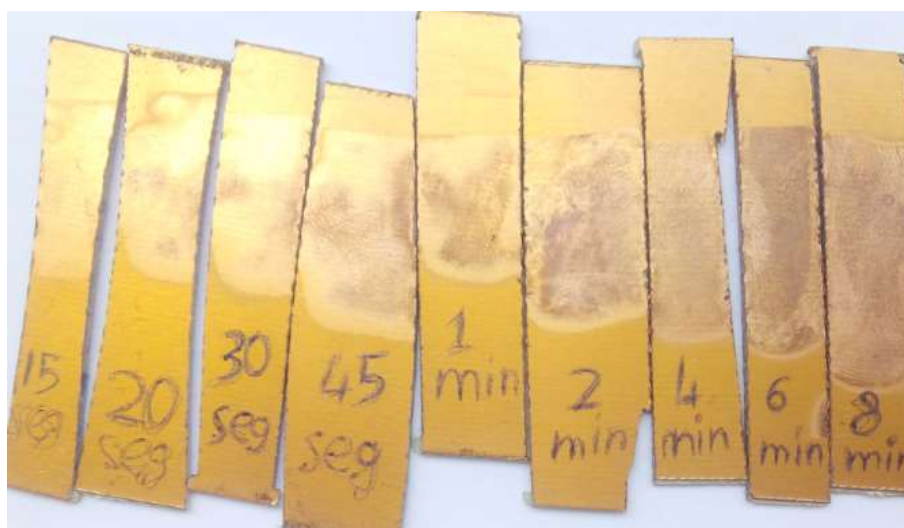


Figura 3-10. Resultado variación del tiempo de insolación

Se puede ver que existe diferencia entre el PCB insolado el menor tiempo (15 segundos) y el de mayor tiempo (8 minutos). En la de menor tiempo aún queda resina en la zona insolada ya que no se ve el cobre, es decir, la tonalidad de la huella es diferente a la de los tiempos mayores. Ya en los PCBs de 20 y 30 segundos se empiezan a ver una serie de manchas que dejan entrever el cobre que queda bajo la resina. Cuando se pasa a 45 segundos y posteriores, se empieza a ver que casi toda la huella ha sido insolada correctamente.

Entonces, se saca la conclusión de que para insolar PCB de este grosor y a esta altura, los tiempos de insolación iban a rondar entre el minuto y los 2 minutos.

La variación de la superficie y forma de la huella es debida principalmente al montaje, que se hizo con pocas limitaciones y orden y que no se impuso una posición y un tamaño de los PCBs, sino que fue todo más arbitrario puesto que para lo que se quería demostrar, era suficiente. En el Capítulo 9 “Experimentos y pruebas” se documentarán experimentos más complejos y con un mayor orden.

3.3 Uso del coat o capucha

En las figuras anteriores se pueden ver que los LEDs tienen las superficies laterales cubiertas por un cilindro de color negro. Este cilindro es el que de ahora en adelante se determinará coat, caperuza o capucha del LED y no es más que una pieza opaca que se instala en el LED para aminorar las pérdidas lumínicas producidas por las superficies laterales del diodo y mejorar la colimación del haz de luz que emite.

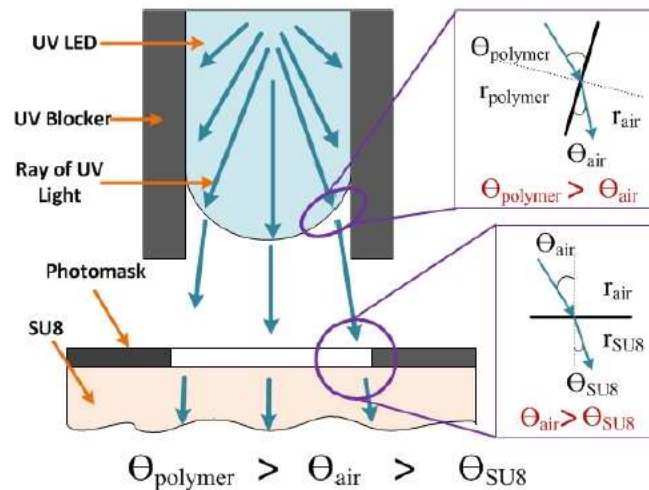


Figura 3-11. Esquema del coat

Como se vio en el subapartado 3.1.2, el ángulo de apertura del LED es la zona donde se concentra entre el 50 y el 90 % de la luz emitida por la lámpara, en el resto de las direcciones se producen pérdidas lumínicas. Con la idea de reducir esas pérdidas y hacer aún más focal la luz emitida por el LED, se instala alrededor de la bóveda una superficie capaz de bloquear la radiación UV. En este caso, con cualquier superficie opaca es suficiente.

Para llevar a cabo esta pequeña modificación en el LED, se usa un material termorretráctil del mismo diámetro que el diodo, de forma que encaje en él como en la figura anterior. En esta figura se puede ver que los rayos del LED quedan dirigidos hacia una superficie más reducida de material fotosensible, en este caso, se utiliza resina SU-8.



Figura 3-12. Montaje de los termorretráctiles

Se recortan los cilindros con la longitud aproximada a la del LED de la forma que se ve en la figura 3-12.

El autor de la Referencia [1] hizo varios experimentos para comprobar la ventaja que suponía el uso de esta cubierta alrededor del LED, los resultados hablan por sí solos en la siguiente figura:

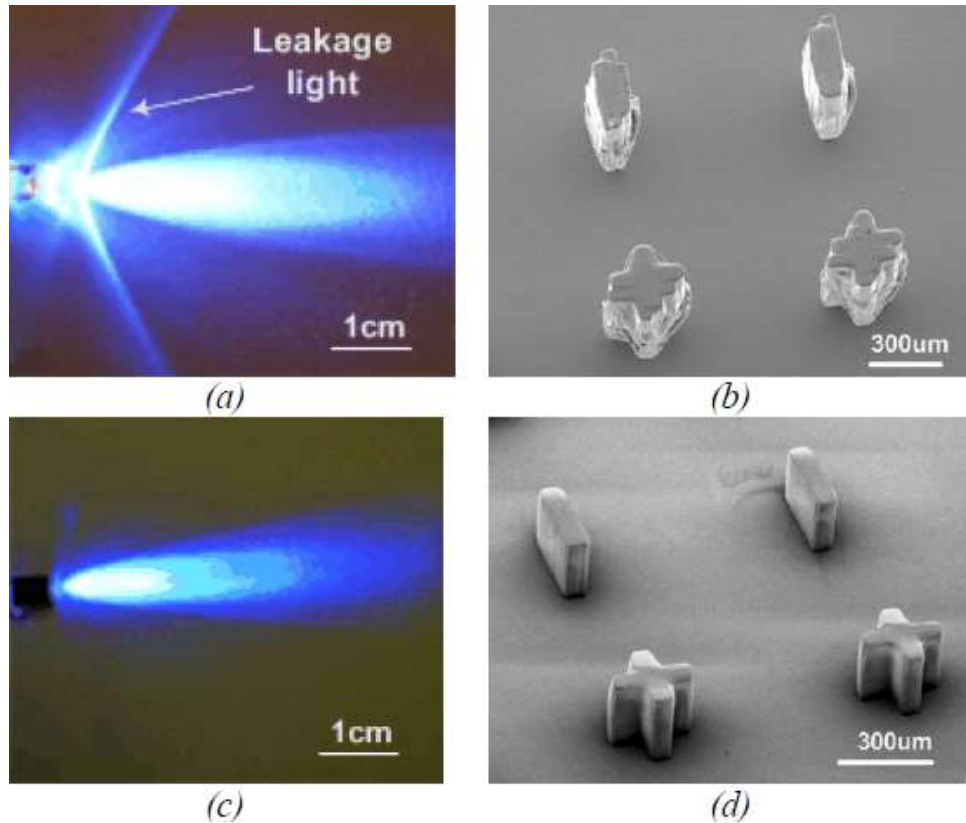


Figura 3-13. Uso del coat

En las imágenes *a* y *b* no se instala la cobertura de la que se habla en este apartado. Se puede ver en *a* que las pérdidas lumínicas son importantes, haciendo que la luz tenga un ángulo de dispersión mayor incluso en direcciones no deseadas. El resultado de esto es la imagen *b*. Se ha insolado resina SU-8 con los LEDs sin el coat y se aprecia que se crean microestructuras con poca resolución. Las paredes laterales no son rectas y las formas están poco definidas. Esto es debido a que la colimación es baja y los rayos emitidos no llegan lo suficientemente paralelos como para definir las formas deseadas.

En cambio, las dos imágenes de abajo muestran el cambio que se produce al instalar esa pequeña porción de material opaco alrededor de la superficie del LED, la luz está mucho más concentrada en su ángulo de apertura y eso tiene como resultado que las microestructuras sean más perfectas, con una gran resolución y con las paredes bastante rectas debido a que la colimación mejora.

La necesidad de usar este elemento era visible. Para ello se hizo una pequeña prueba en el laboratorio. Se insoló una pequeña placa de fabricación de PCB con un solo LED con la caperuza y sin la caperuza, a una tensión $V_{LED} = 3V$, a una altura de 3 cm y con un tiempo de 2 minutos. El resultado fue el obtenido en la figuras 3-14 y 3-15:



Figura 3-14. Con coat



Figura 3-15. Sin coat

La zona circular afectada por la radiación UV emitida por el LED se ha intentado cuantificar en la medida de lo posible con el calibre. La diferencia de diámetro de dicha huella con y sin el coat es de 0.47 mm según se aprecia. Pero lo que no se ha medido con el calibre (debido a las dificultades que conlleva) es el área que realmente se ha insolado, es decir, el círculo pequeño el cual las flechas de las figuras hacen referencia. La superficie es menor cuando no se usa la caperuza que cuando sí, lo que hace que se puedan sacar varias conclusiones que no discrepan con las obtenidas en la Referencia [1]

Cuando no se usa la cubierta, la luz incide en una superficie menor pero con menos potencia, es decir, menos concentrada, ya que el círculo exterior de la huella mayor, en cambio, el círculo del interior de la huella es menor y como realmente la zona correctamente insolada es la que se encuentra dentro del círculo pequeño, se puede concluir con que cuando se usa la cubierta, el LED perturba menos área de la resina pero lo hace con una mayor potencia lumínica.

Dicho esto, se reafirma la idea de usar este concepto en la placa que se va a desarrollar. Durante los primeros desarrollos de la placa de los LEDs se usará el material termorretráctil tal y como se ha redactado en este apartado, pero luego será modificado por una estructura más compleja que aportará más ventajas aparte de la que aquí comentada. Todo esto estará redactado en el Capítulo 4 “Diseño electrónico” y el diseño del nuevo coat estará en el Capítulo 5 “Diseño mecánico”.

De este capítulo se pueden obtener varias conclusiones.

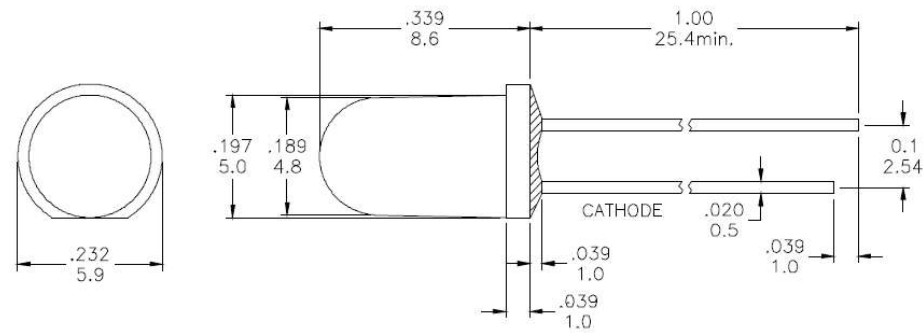
- La primera de ellas y la más importante para el proyecto es que los LEDs funcionan como deben hacerlo y que sería posible insolar con ellos, al menos eran capaces de fabricar PCBs y las microestructuras de resina también serían capaces de generar.
- La segunda conclusión obtenida era la demostrada necesidad del uso del elemento que recubriría al LED por su superficie lateral para que las pérdidas lumínicas fuesen menores y la luz emitida se focalizase mejorando la colimación del haz para así obtener una mayor calidad en las insolaciones y la precisión en la fabricación de las microestructuras fuese la máxima posible debido a que si se quería insolar con un cierto ángulo, dicha precisión iba a ser necesaria.

Después de haber escogido el modelo de LED y haber experimentado ligeramente con él, el siguiente paso sería construir la placa del circuito sobre la que iban a ir montados todas las lámparas UV. Los detalles de la

fabricación de esta placa serán los descritos en el siguiente capítulo.

Las dimensiones del LED usado se ven en la figura 3-16.

Package Dimension



* Tolerance : $\pm \frac{0.01}{0.25}$ Unit : $\pm \frac{\text{inch}}{\text{mm}}$

Figura 3-16. Dimensiones del LED

Las dimensiones más importantes a tener en cuenta serán el diámetro de la bóveda y el diámetro de la superficie interior como se verá en el siguiente apartado cuando se vaya a diseñar la posición y el tamaño de la matriz de LEDs.

4 DISEÑO ELECTRÓNICO

En este capítulo se relatará el diseño y fabricación de la electrónica de la insoladora y tendrá dos partes: el desarrollo de la placa y la construcción del temporizador.

4.1 Diseño de la placa de LEDs

En esta sección se tratará el tema más delicado de la insoladora: el circuito de LEDs que emite la luz ultravioleta que hace que la máquina cumpla su función. Para llegar al estado final de la placa, se tuvo que pasar por varias fases fijando cada una de las características que iba a tener la matriz que emitiese la radiación ultravioleta para la insolación.

Después de haber estado experimentando con los LEDs, este es el siguiente paso natural. Para ello se partía de la base de que el número total de LEDs iban a ser 100 ya que fue un requisito de diseño fijado desde el principio. Si se quisiese ampliar la superficie a insolar, tan sólo hay que incrementar el número de lámparas usadas.

En estos experimentos previos, se conseguía hacer funcionar los LEDs conectados en paralelo con una resistencia conectada en serie con cada uno. Para el diseño del circuito de la insoladora, se pensó que sería conveniente usar dos ideas obtenidas de estos experimentos:

- Eliminación de las resistencias: Los 8 LEDs con sus correspondientes resistencias montados sobre la placa de pruebas se tenía que alimentar el circuito con 23 V de los cuales, 3 V iban a parar al LED y 20 V a la resistencia, debido a alto valor que tenía esta ($1K\Omega$). Esto dejaba en evidencia que si se pudiese eliminar la necesidad de instalar resistencias, se iba a conseguir un mejor diseño. Aparte, si se montasen 100 LEDs con 100 resistencias, los valores de intensidad serían de $I = 20\text{ mA} \cdot 100 = 2\text{ A}$ lo que haría que la placa consumiese una potencia de: $P = V \cdot I = 23\text{ V} \cdot 2\text{ A} = 46\text{ W}$ de los cuales, el 87 % sería debido a las resistencias. Debido a este alto consumo de potencia, las resistencias disipaban mucho calor lo que haría si se intentaba hacer un diseño compacto de la placa, ese calor generado sería difícilmente fácil de disipar y podría traer serios problemas.
- Montaje en paralelo: se buscó mantener esta idea para asegurar un diseño robusto y con un fácil mantenimiento del mismo que alargase su vida útil. Al disponer de las conexiones en paralelo, sería más sencillo detectar y reparar los problemas acontecidos con cada LED llegando al modo de que si alguna vez alguno dejase de funcionar, sería fácilmente intercambiable por otro y los demás diodos de la placa, no dejarían de funcionar. Gracias a esta conexión, si un LED se fundiese durante la insolación, solo sería ese el que dejase de dar radiación ultravioleta lo que generaría una pequeña sombra sobre la superficie fotosensible que podría ser compensada por la luz emitida de los LEDs adyacentes. En cambio, si estuviesen conectados varios LEDs en serie, al fallar uno, lo harían los de su misma rama dejando de iluminar una zona mayor lo que significaría que la insolación hecha sobre la oblea no fuese válida y se tuviese que desechar, lo que era un gran problema debido a que el tiempo de preparación de una oblea con resina SU-8 era muy elevado y complejo.

Con esto se fijaban dos importantes ideas: montaje en paralelo para conseguir un diseño más robusto y eliminar las resistencias que se habían usado previamente para aumentar la eficiencia y evitar problemas como el sobrecalentamiento.

Se usó la misma configuración que en los experimentos anteriores debido a que se había obtenido buenos resultados con estos y no se más desarrollos para intentar ajustar el diseño.

Una vez que se habían fijado las conexiones, quedaba pensar cómo iban a estar los LEDs distribuidos sobre la placa. Dos parámetros geométricos debían ser fijados: la distancia entre los diodos y la forma que tendría la matriz de luz. Esos dos parámetros se resolvieron como sigue:

- Se decidió que la distancia entre la bóveda de un LED y las adyacentes debía de ser la mínima posible. Por dos motivos principalmente: debido al uso de coat sobre el LED y el pequeño ángulo de apertura del mismo, las direcciones que recibirían la luz UV iban a estar dentro de un cono bastante agudo, por lo que generaría una huella circular de poco diámetro. Si los LEDs estuvieran demasiado separados, sus respectivas huellas podrían no cubrir el espacio a insolar y quedarían zonas de sombra dentro de la huella completa de la placa.

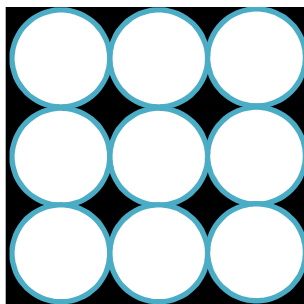


Figura 4-1. Huella: Zonas con sombra debido a alta separación entre LEDs

Si se solapasen las huellas de los LEDs, se solaparía del mismo modo la cantidad de radiación que una determinada zona de la superficie fotosensible recibiría. Es decir, la potencia lumínica total de un área determinada, sería la contribución de la potencia lumínica de los LEDs que proyectasen la luz UV sobre esa zona.

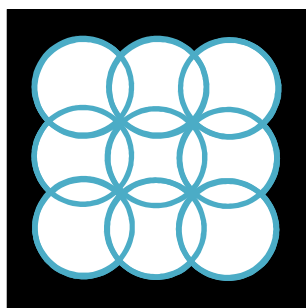


Figura 4-2. Huella: Zonas solapadas a poca separación entre LEDs

Como se puede ver, al solaparse las huellas, el área a insolar es menor pero con la ventaja de que recibe una mayor radiación y se tiene la seguridad de que no hay zonas con sombra o sobre las que incida poca luz. Además, en caso de fallo de uno de los LEDs, gracias a su configuración en paralelo y a reducir lo máximo posible la distancia entre ellos, la sombra generada sería muy reducida.

- Una vez se ha fijado que los LEDs deberían estar a una distancia mínima entre sí, también se debía pensar la forma de la matriz de LEDs que se iba a construir. Se manejaban 2 opciones, forma cuadrada o forma hexagonal. Esta última consiste en mover las filas no consecutivas de la matriz cuadrada en una dirección longitudinal de modo que una fila quede encajada dentro de la otra, siendo la distancia entre LEDs aún menor que con la matriz cuadrada:

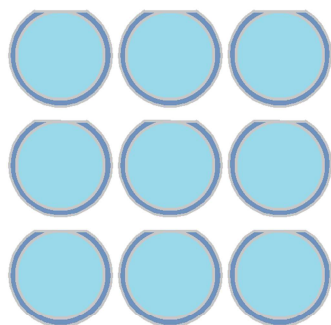


Figura 4-3. Distribución cuadrada

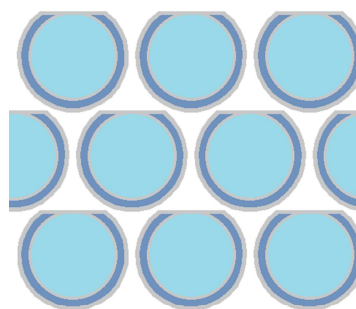


Figura 4-4. Distribución hexagonal

La forma de la figura 4-4 tiene la ventaja de reducir aún más la distancia entre LEDs, pero con el inconveniente de que se pierde la forma cuadrada de la matriz y pasa a ser rectangular. La forma cuadrada tiene la ventaja generar una huella más uniforme y con unos bordes más regulares, así que se decide usar la configuración de la figura 4-3. Además suponía una mayor sencillez a la hora de diseñar la planta de la placa y dibujar las pistas del circuito que conectaría los LEDs entre sí.

Haciendo recopilación del diseño: los LEDs se dispondrían en una matriz cuadrada de forma que la distancia entre los LEDs fuese casi nula. Cada uno de ellos estaría conectados en paralelo entre sí.

Se habían instalado las resistencias a los LEDs a la hora de los experimentos previos era por motivos de seguridad de los mismos haciendo que la tensión recibida por los diodos fuese más invariable frente a la tensión de entrada del circuito. Mantener esta idea era un punto a favor para el proyecto ya que si se conseguía algo similar, se iba a poder garantizar que los LEDs nunca tuvieran que ser desechados por un incremento de la tensión de entrada de la placa. Para ello se buscó una solución.

La solución obtenida fue la de instalar un regulador de tensión con una salida constante. Este dispositivo lo que hace es recibir una tensión continua dentro de un rango de valores y otorgar una salida a una tensión fija.

Después de comparar varios modelos, se concretó que el elegido sería el que tiene la referencia LM1084IT-3.3/NOPB con el datasheet en el Anexo correspondiente.

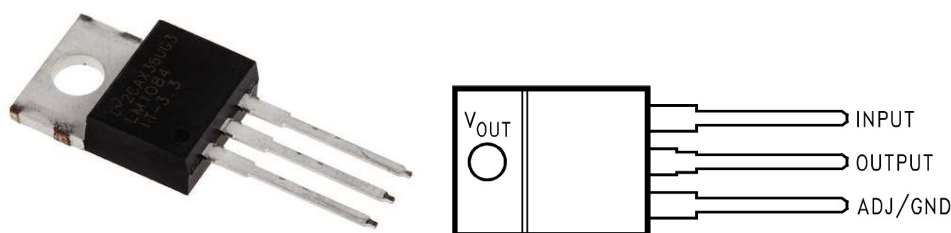


Figura 4-5. Regulador de tensión LM1084IT

Este dispositivo consigue regular la tensión de entrada entre 1.2V y 27V y dar una salida fija de 3.3V con una intensidad máxima de 5A. Era perfecto para la insoladora, los LEDs en vez de ir conectados a 3V lo harían a un nivel ligeramente superior (3.3V), lo que implicaba que la intensidad que pasaba por ellos iba a aumentar también y como se puede ver en la gráfica de la figura 3.5 “Longitud de onda” el pico de longitud de onda iba a estar aún más centrado en 380nm, lo que significaba que los LEDs iba a dar una potencia lumínica constante a cambio de mover su punto de funcionamiento normal a un nivel de con intensidad eléctrica superior.

En la parte derecha de la figura 4-5 está el esquema del regulador, donde se ve que tiene 3 pines: entrada, salida y tierra.

Por el pin de INPUT se debía conectar el cable positivo de la alimentación, el pin OUTPUT debía estar conectado al pin positivo de los LEDs y el pin de GND debía estar conectado a el pin negativo de los LEDs y a la tierra de la fuente de alimentación.

Siguiendo este esquema, se pasó a diseñar el esquemático de la placa, con los 100 LEDs en paralelo y el regulador situado justo después de la entrada de alimentación. Este esquema se puede ver en la figura 4-6 y ha sido generado mediante el software Eagle 7.5.0 el cual es un programa de diseño de PCBs.

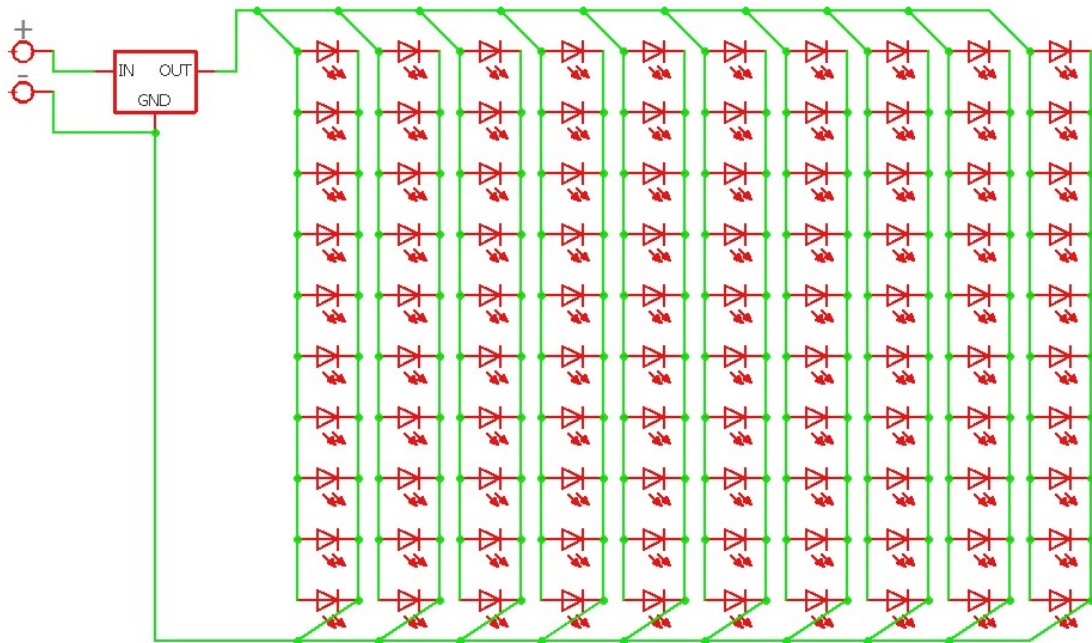


Figura 4-6. Esquemático placa de la insoladora

Para formar la placa de la insoladora, se debía conectar los diodos en 10 filas de 10 LEDs creando así una matriz cuadrada de 10x10. El siguiente paso era dibujar esa matriz en el software y generar el fotolito para la fabricación de la placa. En este programa, lo primero que había que hacer era situar los elementos uno a uno en su posición correspondiente. La forma de situarlos fue la que se puede ver en la figura 4-7.

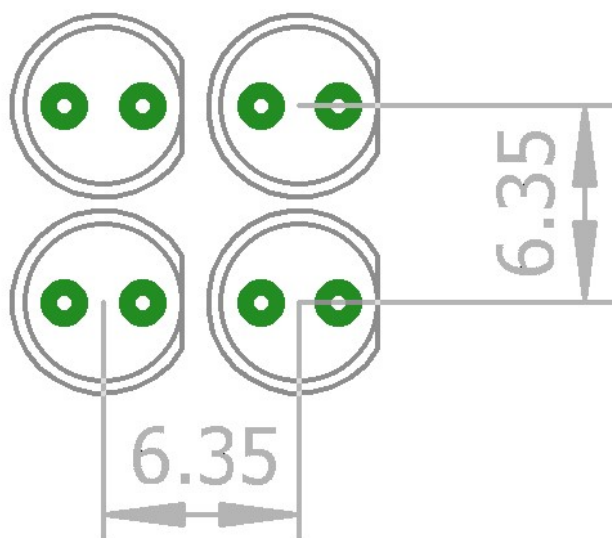


Figura 4-7. Distancia entre LEDs

Puesto que la bóveda de este modelo de LEDs era de 5 mm bajo esta existía una superficie plana con forma circular de 6 mm por lo que se consiguió una separación entre las lámparas de tan solo 0.35 mm .

Repitiendo el patrón de la figura 4-7 hasta completar la matriz, se consiguió obtener la placa completa, la cual se puede ver en la figura 4-8.

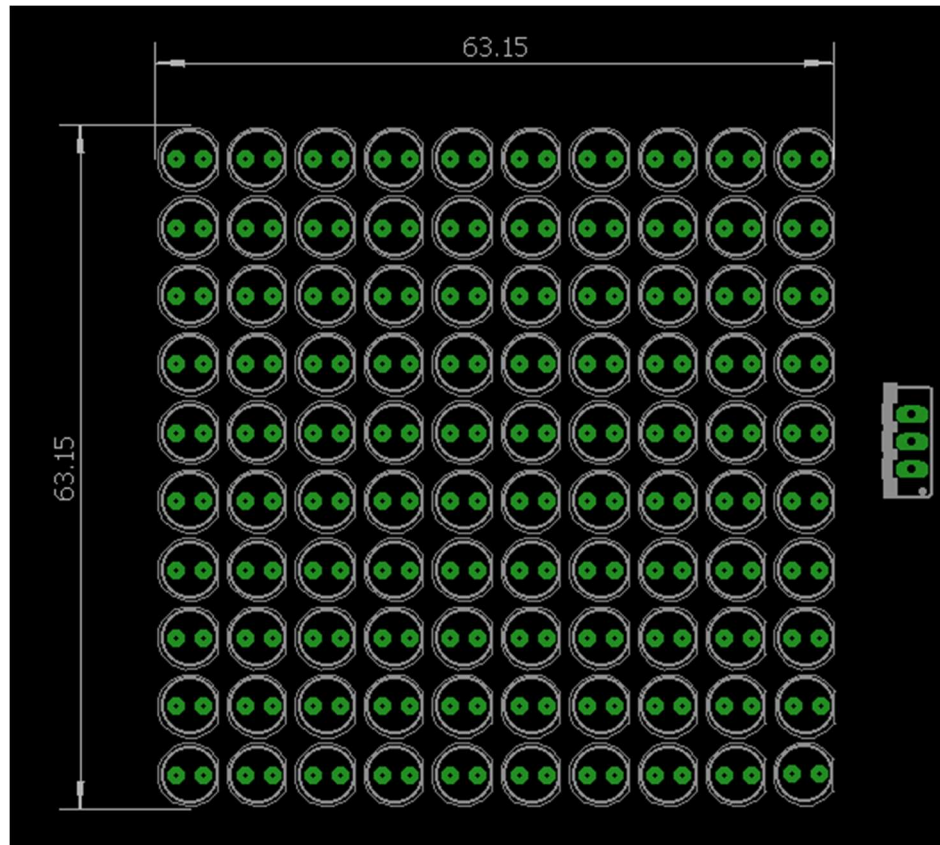


Figura 4-8. Distribución de los LEDs y el regulador

La matriz de LEDs albergaría una superficie cuadrada de 63.15 mm de lado. El regulador iba a estar situado en una zona próxima a las lámparas pero por la otra cara del PCB.

Quedaba ahora diseñar las pistas que conectarían todos los elementos. La forma de proceder era trazar pistas paralelas que pasaran por los pines de los LEDs creando así 10 pasillos con una línea positiva y otra negativa que iban a parar a unas pistas horizontales que llegaban hasta la salida del regulador. Esto se puede ver en la figura 4-9.

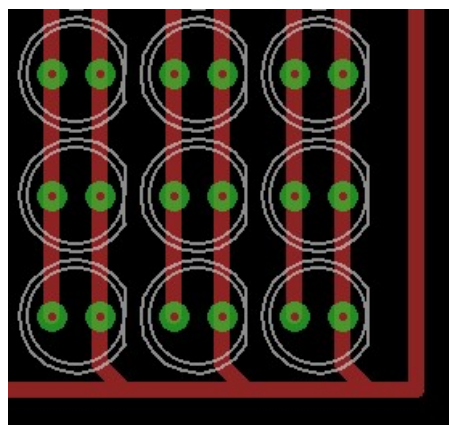


Figura 4-9. Pistas de conexión de la placa

Al principio se hicieron de un ancho de 0.40 mm (0.016 inch) el cual era el tamaño estándar que se usaba en el programa, y con las pistas horizontales que iban a parar a los pines de del regulador el doble de anchas ya que por ellas tenía que pasar la corriente que se iba a dividir para las otras pistas más pequeñas.

Se pasó entonces a generar el fotolito de la placa y se comenzó el proceso de fabricación de la misma.

Se cortó una pieza de PCB de $0.35\text{ }\mu\text{m}$ de espesor de cobre con las medidas para albergar este circuito, se ajustó el fotolito al PCB y se insoló en una insoladora convencional de tubos fluorescentes como la que se ha descrito en el Capítulo 2 “Estado del Arte”.

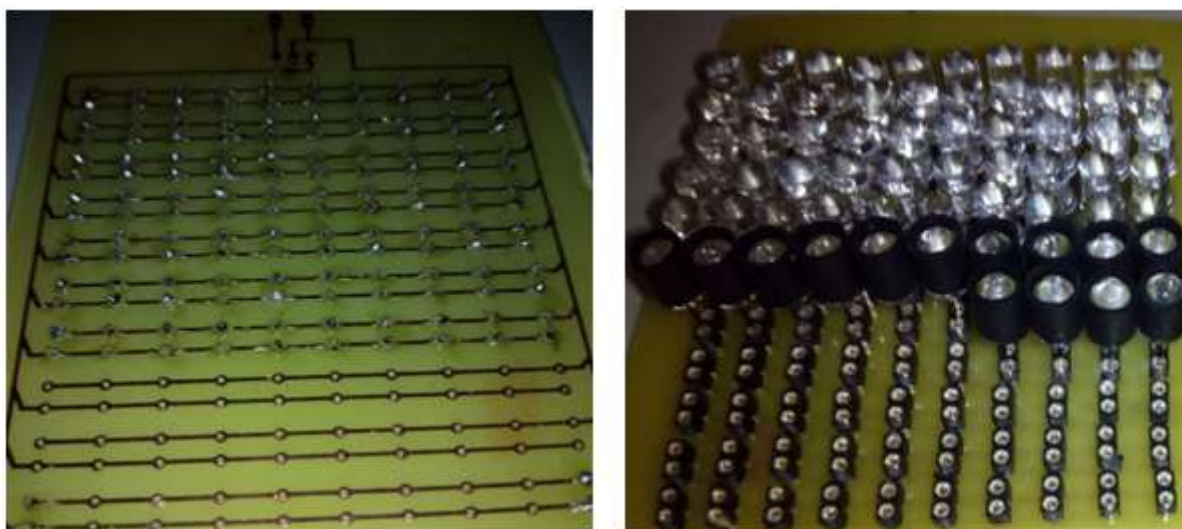
Se tuvo que realizar el proceso completo que se ha descrito en el primer Capítulo el cual era revelar y atacar el PCB para eliminar el cobre sobrante y que sólo quedasen las pistas y los pads del circuito.

Una vez hecho esto, para instalar los elementos había que hacer los taladros sobre los que iban montados. Se procedió a su realización con un pequeño taladro que se situaba en posición vertical al que se le montaba una broca de 0.6 mm para los pines sobre los que iban los LEDs y una broca de 1 mm para los pines del regulador.

Uno a uno se hicieron un total de 205 taladros, 2 por cada LED, 3 para el regulador y 2 para los pines de alimentación del circuito.

Fue una tarea de precisión que fue precedida por la siguiente parte de la fabricación, instalar los componentes y soldarlos uno a uno. Una gran cantidad de puntos de soldaduras tuvieron que ser realizados de forma ordenada ya que debido al poco espacio del que se disponía para ello exigió que se hiciese de forma controlada para facilitar el trabajo.

En vez de montarse los LEDs directamente, se soldaron conectores de forma que los LEDs fuesen fácilmente reemplazables, es decir, que los pines de los LEDs iban introducidos en estos elementos de una forma sencilla y que permitía sacar y reponer el LED rápidamente cuando fuese necesario. Además, como esta placa era la primera que se hacía, no se tenía la completa seguridad de que fuese a ser la definitiva y este sistema de pines iba a permitir cambiar los LEDs fácilmente sin tener que desoldarlos.

*Figura 4-10. Proceso de fabricación de la placa*

En la figura 4-10 se ven algunas fotos del proceso de fabricación de la placa, en la de la derecha aún no se ha terminado de soldar todos los conectores para los LEDs y en la de la izquierda se puede ver cómo se van instalando los LEDs y el coat que se ha determinado imponer.

Antes de instalar el regulador, se procedió a probar la placa con tan solo los LEDs sobre los pines a una tensión de $3.3V$ tal y como serían alimentados cuando se terminase de construir el circuito,

Se había calculado que la intensidad consumida debía ser próxima a $3A$ según la figura 4-12.

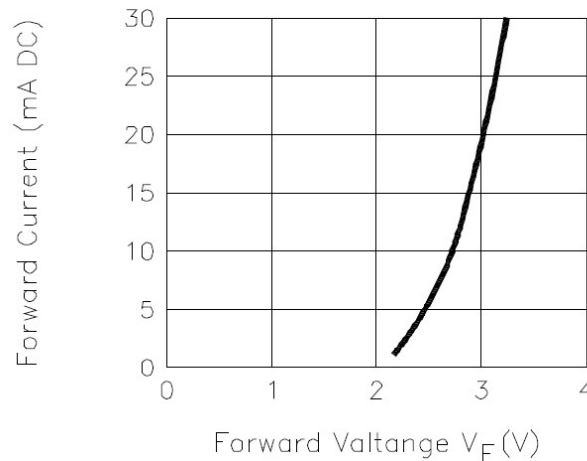


Figura 4-12. Tensión frente a Intensidad del LED

El resultado fue alarmante cuando se procedió a su primer encendido y se comprobó que los LEDs emitían una luz menos intensa que cuando se estaban probando durante los experimentos previos. Con la tensión de $3.3V$ la intensidad alcanzada era de $1.7A$, lo que quiere decir que la intensidad para cada LED era $17mA$. Este hecho hacía que los LEDs no diesen la potencia lumínica suficiente y que no emitiesen en la longitud de onda que se requería por lo que había que solucionarlo.

En vez de aumentar la intensidad debido a que se había pasado de tener $3V$ a $3.3V$, lo que hizo fue reducirse. La única explicación a este fenómeno era la existencia de una resistencia con la que no se había contado anteriormente, dicha resistencia es la que se ha llamado Resistencia Parásita del circuito.

La resistencia parásita es la que se genera por las pistas de cobre del PCB, la cual depende de las dimensiones de dichas pistas como se demuestra en la expresión teórica de la resistencia de un conductor:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} = \rho \cdot \frac{L}{h \cdot w} \quad (4-1)$$

Esta expresión significa que la resistencia de un conductor es igual a su resistividad ρ , multiplicada por la longitud L y dividido por el área de la sección A , que cuando es rectangular es igual a base por altura $h \cdot w$. En la figura 4-13 se pueden ver tales dimensiones:

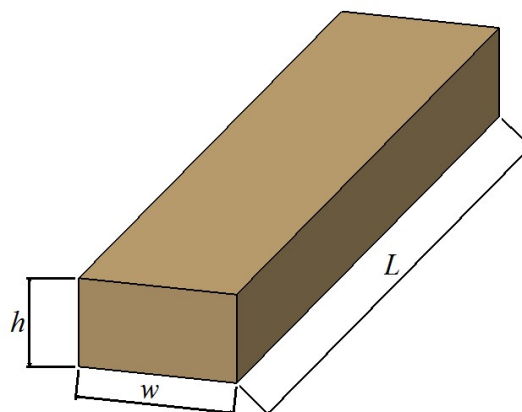


Figura 4-13. Esquema de las pistas del circuito

En el caso de los PCBs la sección de las pistas de cobre tiene la forma de la figura 4-13. Se puede representar como un prisma de gran alargamiento lo que significa que la resistencia puede ser bastante elevada como en este caso.

Debido a que el diseño de la situación de los LEDs estaba bastante fijo, la longitud de las pistas que unían todos los elementos era ya invariable, y que la resistividad venía fijada por el tipo de cobre que se usaban en estas placas para PCBs, la única forma de reducir la resistencia de las pistas era aumentar la sección de las mismas de manera considerable. Para comprobar que era una solución viable se experimentó con la placa que se tenía, añadiendo estaño sobre las pistas del circuito lo que significaba un aumento sustancial de la sección. La evidencia de ello se puede ver en la figura 4-14:

*Figura 4-14. Pista del circuito cubierta de estaño*

Se añadió estaño sobre las pistas exteriores del circuito, por ella pasaba la corriente total de la insoladora y por las que se ve iban a producir más pérdidas. Con tan solo bañar de estaño esta línea se consiguió que la intensidad consumida por el circuito de la placa pasase de valer $1.7A$ a alcanzar los $2.05A$, así que se demostró que el razonamiento era correcto.

Debido a estas evidencias y a que la solución de bañar el circuito en estaño no era lo más aconsejable se tomó la decisión de volver a fabricar el PCB.

Para reducir la resistencia parásita de las pistas se incrementó la sección de todas las líneas del circuito y especialmente las más exteriores ya que eran por las que más intensidad pasaba y las que eran más fácil de expandir debido a su posición. El mismo circuito esquemático que en caso anterior (el representado en la figura 4-6).

Se fijaron las dimensiones que iba a tener el PCB y se intentó mantener la mayor cantidad de cobre del mismo consiguiendo así tener una mayor sección sin un aumento de la longitud de las pistas.

Las pistas que unían los LEDs entre sí incrementaron su longitud hasta los 1.9 mm (0.76 inch) frente a los 0.40 mm (0.016 inch) de la placa anterior, el ancho se había doblado en estas pistas, pero en las más exteriores se pasó de tener 0.80 mm a tener 17.5 mm lo que suponía un salto cualitativo del ancho de estas pistas. Se generó el fotolito que se puede ver en el Anexo [2] y se pasó a fabricar el PCB.

Para seguir aumentando la sección de las líneas del circuito, se cambió el espesor del PCB usado, pasando de usar $35\mu\text{m}$ a $70\mu\text{m}$ de espesor de cobre.

Con estos cambios se conseguiría reducir la resistencia del circuito que parasitaba la energía a los LEDs y hacía que no funcionase en las condiciones que se necesitaban. Esa disminución de resistencia se puede cuantificar fácilmente a partir de la expresión 4-1 que ya se había comentado. Para ello, se ha hecho el siguiente desarrollo donde las propiedades con el subíndice 1 son las de la placa anterior y las propiedades con el subíndice 2 son la nueva.

$$R_1 = \rho \cdot \frac{L}{h_1 \cdot w_1} \quad R_2 = \rho \cdot \frac{L}{h_2 \cdot w_2}$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{\rho \cdot \frac{L}{h_1 \cdot w_1}}{\rho \cdot \frac{L}{h_2 \cdot w_2}} = \frac{h_1 \cdot w_1}{h_2 \cdot w_2}$$

Particularizando para el espesor de cobre de cada PCB usado:

$$\begin{array}{l} h_1 = 35 \mu m \\ h_2 = 70 \mu m \end{array} \rightarrow \frac{R_2}{R_1} = \frac{35 \cdot w_1}{70 \cdot w_2}$$

Y si ahora se particulariza para las pistas que van entre los LEDs de ambos circuitos:

$$\begin{array}{l} w_1 = 0.4 mm \\ w_2 = 1.9 mm \end{array} \rightarrow \frac{R_2}{R_1} = \frac{35 \cdot 0.4}{70 \cdot 1.9} = 0.1052$$

Es decir, la resistencia de las nuevas pistas son el 10,5 % de la anterior, en otras palabras, la resistencia de este tipo de líneas se reducían casi un 90 % lo que significaba que la mejora de una placa con respecto a otra era más que evidente.

En el caso de que se comparasen las pistas exteriores, las cuales sufrieron un aumento descomunal de su sección, se tiene:

$$\begin{array}{l} w_1 = 0.8 mm \\ w_2 = 17.5 mm \end{array} \rightarrow \frac{R_2}{R_1} = \frac{0.8 \cdot 35}{17.5 \cdot 75} = 0.023$$

La resistencia de estas líneas del nuevo diseño sería un 2.3 % del valor del anterior diseño. Queda mejor decir que la resistencia eléctrica de estas pistas es ahora un 97.7 % menor lo que justificaba de más la modificación de la placa de la insoladora.

La placa fue fabricada entonces, se hicieron pruebas antes de montar el regulador y con una tensión de 3.3V se alcanzaba el resultado esperado, un aumento sustancial de la intensidad hasta a alcanzar los 3 A.

Una vez hecho esto, se tenía que instalar el regulador. La tensión con la que se iba a alimentar al circuito completo se tenía que elegir. No debía ser muy alta para no consumir demasiada potencia, pero debía ser suficiente para que el circuito funcionase correctamente. Se decidió fijar la tensión en 5 V debido a que es una tensión bastante común y si llegada la hora de buscar un transformador para conectar la insoladora directamente desde cualquier enchufe sería más fácil encontrar uno que se ajuste a esas tensión e intensidad.

Se podía montar entonces el regulador sobre la placa. Al ser un elemento muy pequeño por el que tenía que pasar una intensidad muy alta, se tenía por seguro que iba a sufrir un sobrecalentamiento que se debía evitar en la medida de lo posible. Entonces la manera usual de evitar dicho efecto es instalar sobre el regulador una aleta disipadora. Para ello, previamente se debía calcular las dimensiones de dicha aleta.

❖ Cálculo de aleta de disipación para el regulador de la placa

La aleta que debe ser instalada dependerá de la potencia eléctrica que consuma el regulador y de las propiedades térmicas de este. La potencia eléctrica dependerá de la intensidad que pase a través de él y de la tensión que tenga que regular, es decir, la diferencia entre la tensión de entrada y la de salida. Esta

potencia tiene la siguiente expresión 4-2

$$P_D = (V_{IN} - V_{OUT}) \cdot I \quad (4-2)$$

Esta potencia deberá generar un calor que deberá ser canalizado al ambiente por el disipador, que irá instalado en la aleta del regulador. Las propiedades de disipación del regulador vienen dadas por el fabricante mediante fórmulas y parámetros en su datasheet, el cual está en el Anexo [1]. La fórmula usada para el cálculo no es más que la Ley de Ohm térmica, la cual es la expresión 4-3

$$k \cdot T_{J_{max}} - T_a = P_D \cdot (\theta_{JC} + \theta_{CH} + \theta_{HA}) \quad (4-3)$$

Tabla 4-1. Parámetros térmicos del regulador

$T_{J_{max}}$: Temperatura máxima de la unión	θ_{JC} : Resistencia térmica entre la unión y la cápsula
T_a : Temperatura ambiente	θ_{CH} : Resistencia térmica entre la cápsula y el disipador
k : Factor de seguridad	θ_{HA} : Resistencia térmica entre el disipador y el ambiente

La ecuación 4-3 es obtenida al hacer una analogía de la Ley de Ohm eléctrica para un problema de transmisión de calor.

El regulador está compuesto de varias partes, el punto donde se empieza a generar el calor es en la unión. Este calor es transmitido a la cápsula del regulador con una resistencia térmica θ_{JC} . A esta cápsula será donde se conecta el elemento disipador, en este caso una aleta, y además es posible que entre cápsula y aleta exista algún otro material o sustancia, esto estaría cuantificado por el valor de θ_{CH} . Finalmente, el elemento disipador disipará el calor al ambiente con una resistencia térmica θ_{HA} .

El valor máximo de temperatura que la unión del regulador puede soportar está dado por el fabricante y en este caso tiene el valor de $T_{J_{max}} = 125^\circ\text{C}$. A este valor se le ha aplicado un factor de seguridad k que valdrá entre 0 y 1, el valor fijado será de 0.9. La temperatura ambiente es la del aire anexo al regulador en las condiciones de funcionamiento, desde el lado de la seguridad, se establecerá un valor de $T_a = 40^\circ\text{C}$.

Los valores de las resistencias térmicas son los siguientes: $\theta_{JC} = 2.7^\circ\text{C}/\text{W}$ dado por el fabricante, $\theta_{CH} = 1^\circ\text{C}/\text{W}$ debido a que no se usará ningún elemento entre la cápsula y el disipador y este es un valor que se toma por regla general.

Finalmente, θ_{HA} será el valor a calcular en este problema y el que dará dimensión a la aleta disipadora que se le instalará. Despejando este valor de la ecuación 4-3 y combinando con la ecuación 4-2 que determina la potencia se tiene que:

$$\theta_{HA} = \frac{k \cdot T_{J_{max}} - T_a}{(V_{IN} - V_{OUT}) \cdot I} - \theta_{JC} - \theta_{CH} \quad (4-4)$$

Los valores de estos parámetros vienen recogidos en la tabla 4-2.

Tabla 4-2. Valores de los parámetros térmicos del problema

$T_{J_{max}} = 125^\circ\text{C}$	$\theta_{JC} = 2.7^\circ\text{C}/\text{W}$	$V_{IN} = 5\text{ V}$
$T_a = 40^\circ\text{C}$	$\theta_{CH} = 1^\circ\text{C}/\text{W}$	$V_{OUT} = 3.3\text{ V}$
$k = 0.9$		$I = 3\text{ A}$

Sustituyendo en la ecuación 4-4:

$$\theta_{HA} = \frac{0.9 \cdot 125 - 40}{(5 - 3.3) \cdot 3} - 2.7 - 1 = 10.5 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

Esta resistencia térmica es el parámetro que define la aleta disipadora. Se debe buscar una que tenga este valor o menor, ya que mientras más pequeño sea θ_{HA} mayor será el calor disipado por la aleta.

En este caso, se tenía disponible una aleta con $\theta_{HA} = 5.5 \text{ } ^\circ\text{C/W}$, dicha aleta tiene la referencia SK 574/50 SA y se puede ver en el Anexo [1].

Al ser la resistencia térmica menor, se conseguía un sobredimensionado de la solución al problema térmico del regulador, lo que implica que se disiparía de forma correcta la potencia que en este elemento se generase.

Con este cálculo, se cerraba así el diseño completo de la placa y se procedía al montaje del regulador y el disipador, los cuales se ajustaban entre sí mediante una pinza estándar para disipadores, la cual los mantendría unidos.

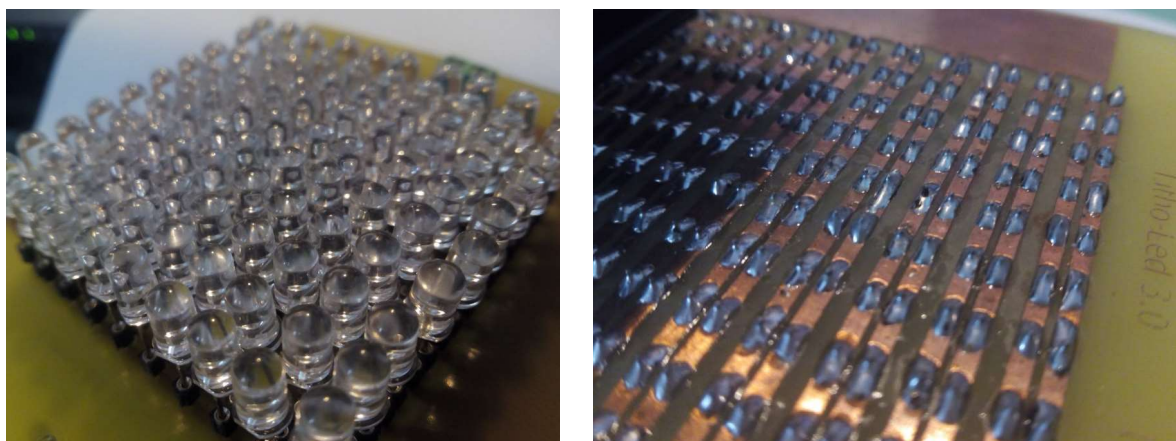


Figura 4-15. Placa de la insoladora. Vista superior e inferior

La fabricación fue similar a la del PCB anterior, se mantendría el uso de los conectores de pines en vez de soldar los LEDs directamente al PCB. El resultado de instalar el regulador fue el que se puede ver en la figura 4-16

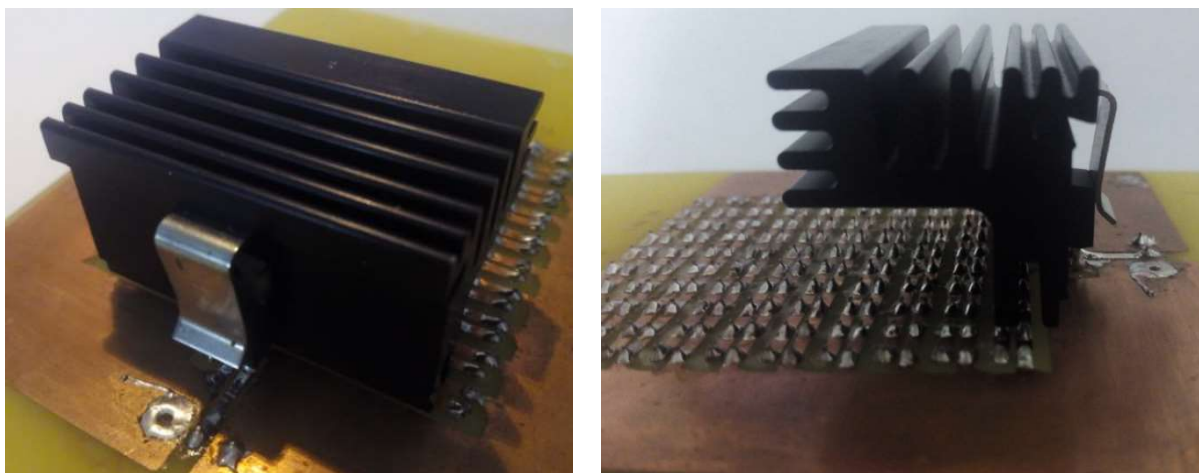


Figura 4-16. Regulador de tensión y disipador de calor

En esta imágenes se pueden ver el gran ancho que tienen las pistas del circuito, tal y como se habían diseñado

lo cual permitió que se alcanzasen los valores requeridos de tensión e intensidad en los LEDs.

Se obtenía así la placa que generaba la fuente de radiación ultravioleta que daría la funcionalidad a la insoladora. Finalmente se había obtenido un diseño compacto, eficiente y funcional, a la vez que económico, ya que los elementos que no eran los LEDs no habían incrementado el precio de manera sustancial con respecto a ellos.

Esta sería la definitiva para la insoladora y la que iba a conseguir los objetivos fijados en cuanto a fabricación de PCBs y microestructuras. La potencia de esta placa era la siguiente:

$$P = V \cdot I = 5V \cdot 3A = 15W$$

Como ya se tenía lo fundamental de la insoladora, se podía comenzar a hacer insolaciones y generar estructuras a pequeña escala y PCBs. Los resultados durante los experimentos están recogidos en el Capítulo 6 “Experimentos y pruebas”

En el siguiente subapartado se describirá la construcción de un circuito temporizador que será el sistema mediante el cual se controlará el tiempo que esta placa de LEDs estará en funcionamiento. La fabricación será más sencilla pero el diseño electrónico más complejo.

4.2 Temporizador y driver

El temporizador era una idea que se había tenido desde el principio debido a la importancia de la variable del tiempo de insolación. Especialmente en la fabricación de microestructuras con SU-8 el tiempo juega un papel importante ya que se suele insolar en pequeños intervalos de 20 segundos con unos descansos de 10 segundos donde la resina no recibe radiación. Con esto se evita un sobrecalentamiento de la resina y que no se produzcan defectos internos debido a una acumulación de tensiones o a la mala polimerización.

Con base en esto, se pensó en que lo mejor sería incluir en la insoladora un dispositivo que fuese capaz de controlar el tiempo que la placa de luz iba a estar en funcionamiento. Primeramente se pensó en comprar un temporizador comercial.

Se hizo una investigación entre las opciones disponibles y se barajaban varias opciones.

De las primeras opciones que se tuvieron en cuenta fue el adquirir un componente especialmente diseñado para esto, un temporizador en el que se pudiese escoger el tiempo necesitado y que hiciese que las lámparas UV estuviesen encendidas dicho tiempo.

Los distintos fabricantes de componentes electrónicos ofrecían varios tipos de temporizadores. Los modelos se diferenciaban en el rango de tiempo para el cual se podía usar, si era analógico o digital o la tensión a la que funcionaba dicho componente. Interesaba un temporizador que se pudiese controlar en segundos ya que el proceso de fabricación de las microestructuras en SU-8 incluía intervalos de tiempo de ese orden. Uno de los modelos que se podía ajustar a los requisitos es el que se puede ver en la figura 4-17 con las especificaciones de la tabla 4-3.



Tabla 4-3. Características del temporizador

Referencia	H3C-R11
Rango de tiempos	0.2s...300h
Tensión de alimentación	24...240V CC, 24...240V CA
Dimensiones	45 x 45 mm
Tipo de control	Analógico

Figura 4-17. Temporizador H3C-R11

Este aparato permitía seleccionar un amplio campo de tiempos dependiendo de a que pines se conectase el circuito a controlar. Disponía de 8 pines en su parte trasera que si se conectaban 2 determinados, el rango de tiempos que la ruleta de selección permitía elegir iba a ser en segundos, minutos u horas, dependiendo de que 2 pines se conectase. En el caso de que se hubiese adquirido este componente se hubiese utilizado el modo de trabajo que hacía que la ruleta selectora funcionase en segundos y tendría que ir alimentado por una línea aparte a la de la placa ya que funcionaba a una tensión mínima de 24 V

En el mercado había una gran variedad de temporizadores que funcionasen mediante un relé como este. Los modelos digitales permitían controlar de una manera más precisa y cómoda los tiempos, en comparación con la ruleta del modelo descrito, la cual parecía un tanto rudimentaria.

Este modelo tenía un coste relativamente elevado (más de 20€) y era el más económico que se había encontrado por lo que se pensó en buscar una alternativa a comprar un temporizador de este tipo.

La alternativa encontrada fue la de fabricar un circuito temporizador basado en un microcontrolador programado para que hiciese funcionar la placa de LEDs un tiempo determinado. En lo que sigue de este punto se describirá el proceso seguido para obtener dicha placa del temporizador así como las características que tiene.

El temporizador iba a ser construido con base en un microcontrolador de 20 pines que sería programado para que diese funcionamiento a la placa de LEDs un determinado intervalo de tiempo.

Como se ha comentado anteriormente, para la resina SU-8 se suele insolar en intervalos de 20 segundos, por lo que no era una mala opción comenzar programando este micro para que hiciese funcionar la insoladora en ese periodo de tiempo.

El microcontrolador usado fue el siguiente que representa en la figura 4-18

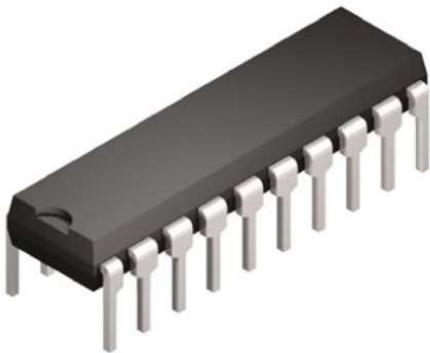


Tabla 4-4. Características del microcontrolador

Referencia	MSP430G2452IN20
Tensión de funcionamiento	De 1.8V a 3.6V
Velocidad de la CPU	Hasta 16MHz
Memoria RAM	4KB
Memoria Flash	56KB

Figura 4-18. Microcontrolador

Este microcontrolador es programado a través del software Energía con la función que hace que la placa de LEDs esté encendida 20 segundos. El código de dicha función se puede ver en el anexo correspondiente.

El programa es sencillo, pero es fácilmente ampliable con tan sólo reprogramar el microcontrolador pudiéndose cambiar los tiempos que deja pasar la corriente de una manera trivial.

Como la alimentación del microcontrolador de esta placa es de 3.3 V, era necesario instalar otro regulador como el usado en la placa de la insoladora que realizase la misma función. De esta manera, la tensión del sistema LEDs + temporizador es la misma.

En este caso, la aleta no es requerida ya que la intensidad que pasa por el regulador de tensión es muy baja, por lo que genera poca potencia y no sufre un calentamiento importante. Esto supone la supresión de un elemento que trae un ligero sobrecoste en esta placa.

La razón por la que la placa del temporizador no está incluida en la placa de los LEDs es porque se ha pretendido separar la parte electrónica de control de la óptica que genera la radiación UV. Si hubiesen estado en una misma placa, con un regulador hubiese sido suficiente, pero en este caso no se ha querido configurar así para evitar pérdidas de corriente. Debido a que la corriente que suministra el regulador de la placa de LEDs es de unos 3A,

al haber más cables o pistas de por medio, aparte de los necesarios para los diodos, iban a disipar una potencia elevada lo que generaría directamente pérdidas en cuanto a la alimentación de los LED y podrían no alcanzar el punto de funcionamiento requerido

Aparte del microcontrolador con el regulador conectado, se necesitaban más elementos para dar la funcionalidad requerida al temporizador.

Uno de los más importantes el que actúa como driver. El driver está constituido por un circuito integrado del tipo Quad Darlington con referencia ULN2064B. Este elemento de 16 pines es el que recibe la señal del microcontrolador y es el que suministra la corriente necesaria a la placa de los 100 LEDs.

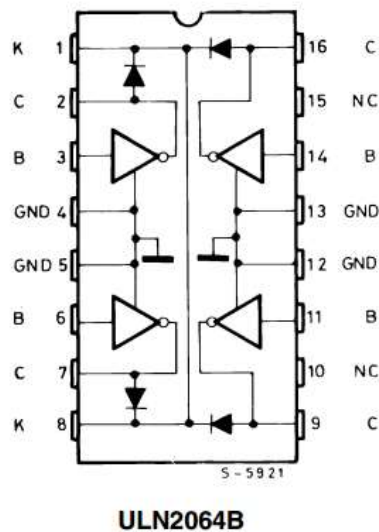


Figura 4-19. Esquema Quad Darlington

En el esquema de la figura 4-19 se puede ver que el quad Darlington está formado por 4 pares de transistores bipolares dispuestos en tándem o cascada en un único dispositivo.

La corriente suministrada a los LEDs es función de las entradas que se conecten del driver, en este caso se conectaron todas para que pudiese suministrar la mayor cantidad posible de intensidad, que según el datasheet era 1.75 A por cada entrada, por lo que la intensidad máxima que se puede hacer llegar a los LEDs es de 3.5 A.

El circuito esquemático de la placa del temporizador es el que está en la figura 4-20.

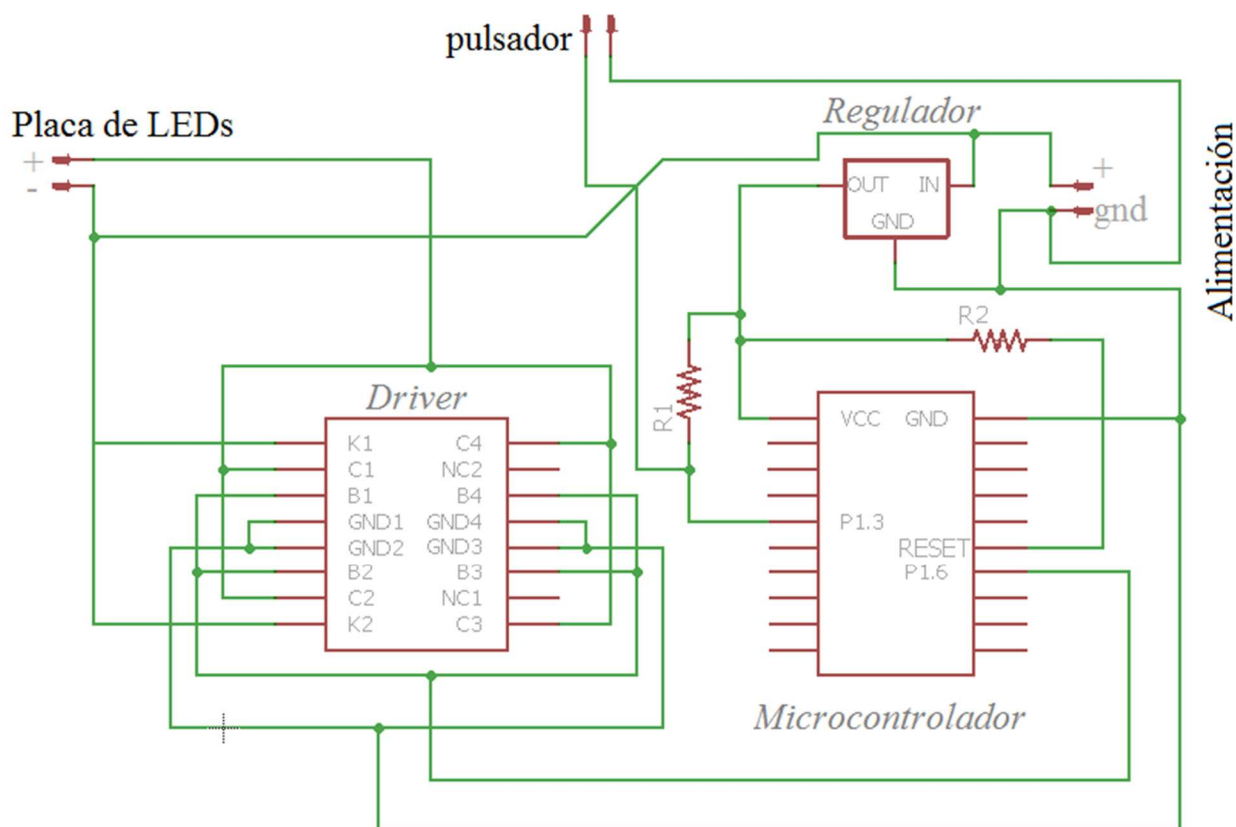


Figura 4-20. Esquemático del temporizador

Como se puede ver, se ha conectado una resistencia a la pata del Reset del microcontrolador la cual sirve para evitar el reset del mismo.

Para controlar la activación de este circuito, se conectó un pulsador de modo que fuese el que activase al microcontrolador que hiciese que el driver dejase pasar corriente a la placa de la insoladora durante 20 segundos. Fue necesario instalar una resistencia de Pull-Up en el pulsador para hacer que no estuviese al aire y tuviese un valor lógico definido.

El esquema de conexión del driver es tal que se usan las dos entradas que trae, como se puede ver en la figura 4-20. De esta forma se tiene funcionando con los 4 pares Darlington de los que se componen y otorgando una corriente máxima de 3.5 A

Una vez elegido como iba a ser el temporizador, se procedió a la fabricación del PCB y al posterior ensamblaje de los elementos. El resultado se puede ver en la figura 4-21.

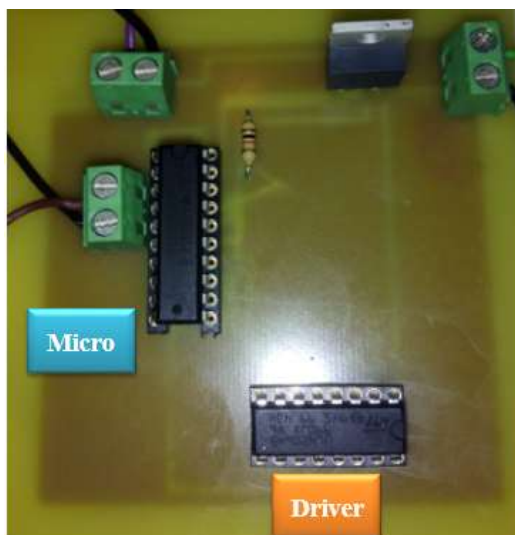


Figura 4-21. Temporizador

Se generaron unas pistas lo más anchas posibles para que el driver disipase calor a través de los pines del encapsulado y así evitar el sobrecalentamiento del mismo. La fotomáscara para generar esta placa está incluida en el anexo correspondiente a Fitolitos de placas electrónicas

Tanto para la entrada como para la salida de la corriente de esta placa se han instalado unos conectores para facilitar el trabajo de montaje y acoplamiento con la placa de LEDs y el pulsador, así como con la toma de corriente por la que va alimentado el circuito de los LEDs. También se conseguía una mejor conexión y se aseguraba que la posición de los cables fuese la correcta.

Una vez construida, se realizó el primer encendido para su verificación. Al conectarla con la placa de la luz se comprobó que para la tensión de 5 V, la intensidad del sistema completo no alcanzaba los 2 A. Esto era causa del quad Darlington, el cual necesita una tensión algo superior a 5 V para su correcto funcionamiento. Por lo que se subió el valor hasta 5.5 V y la intensidad alcanzada era la esperada: 3 A consiguiéndose que los LEDs radiasen con la potencia requerida.

Otra comprobación que se hizo fue medir la intensidad que recorría el regulador. Esta era alrededor de 0.8 mA por lo que la potencia disipada era pequeña así que no sería necesario aleta en este elemento. Si se realizan los cálculos con la fórmula 4-4 (Ley de Ohm Térmica) se obtiene un resultado de resistencia térmica entre el disipador y el ambiente (θ_{HA}) muy elevado, significando lo antes predicho, la instalación de un disipador no es requerida.

Con la fabricación del temporizador se conseguía un importante sistema de control para la insoladora que permitiría controlar una de las variables más importantes en el proceso de insolado. Este temporizador es un sistema sencillo y económico que ha supuesto una buena alternativa a la opción de adquirir uno comercial por lo que se ha conseguido abaratar costes y posiblemente aumentar la eficiencia del producto ya que el consumo de potencia es muy bajo.

De hecho, se podría calcular fácilmente, ya que se ha fijado la tensión de alimentación de las dos placas con un valor de 5.5 V lo que hace que la intensidad sea de 3 A. Por lo que la potencia de la insoladora queda fijada en:

$$P_T = P_L + P_T = 5.5V \cdot 3A = 16.5 W$$

Un consumo muy reducido donde realmente los LEDs consumen el 60 % de ese valor (9.9 W) y el resto de la potencia va a parar al regulador de la placa y al temporizador.

Con esto se cierra la parte del diseño electrónico de la insoladora. Es una de las partes más importantes de la misma ya que, como se ha comentado varias veces, es la que le da la funcionalidad de insoladora como tal.

En el siguiente capítulo se documentará la parte del diseño del resto de elementos que componen la insoladora, siendo los más importantes el mecanismo de giro del eje para insolar con un ángulo y la caja que servirá de soporte para la matriz de LEDs y el resto de elementos.

5 DISEÑO MECÁNICO

En este capítulo se explica la parte del diseño mecánico del conjunto de la insoladora. El principio del mismo tratará sobre los cálculos previos de varios parámetros que darán las dimensiones más importantes que debe cumplir el diseño. La segunda parte serán todos los detalles del diseño que estará basado en los resultados de la primera parte.

5.1 Cálculos previos

Antes de empezar a diseñar el entorno de la placa de LEDs, hay que realizar una serie de cálculos previos de parámetros geométricos importantes para la insolación, entre ellos están la distancia entre los LEDs y la superficie fotosensible o la posición de la huella que estos LEDs generan sobre esta superficie.

5.1.1 Cálculo de la altura de insolación

La radiación que los LEDs emiten tiene dependencia con la distancia entre la superficie que recibe dicha radiación y la fuente, por lo que es necesario calcular a que distancia se situará la placa con respecto a la superficie a insolar. Este subapartado está dedicado a la realización de esos cálculos.

La representación geométrica de este problema está reflejado en la figura 5-1. En este esquema aparece la incógnita a calcular y_0 .

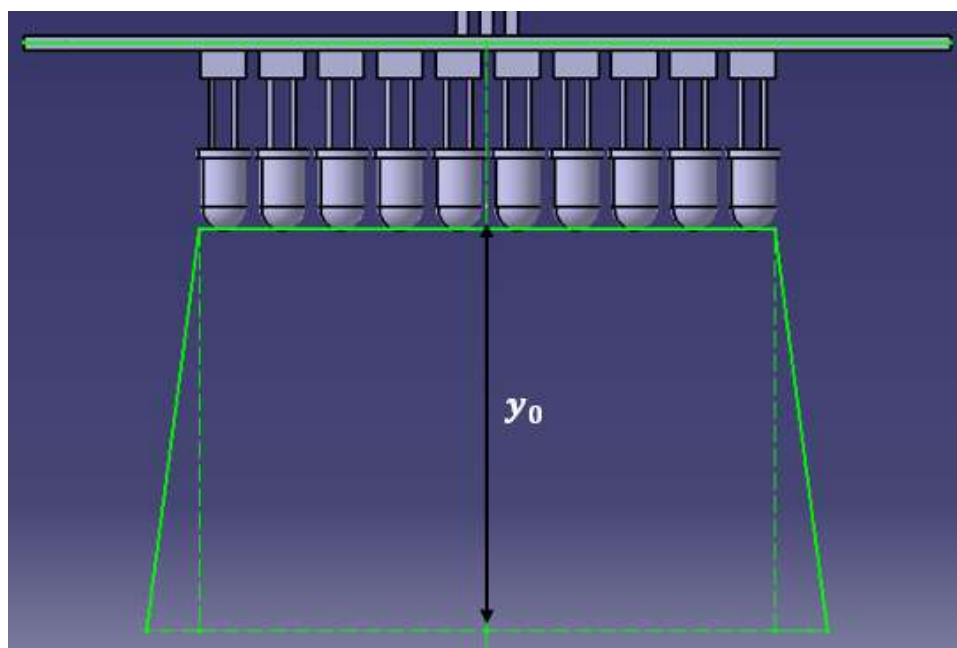


Figura 5-1. Altura de insolación

Como se ha comentado antes, la potencia lumínica está relacionada de forma inversamente proporcional con la distancia entre el foco de radiación y elemento receptor, por lo que la forma de calcular esta variable será fijar un límite del valor de la potencia lumínica por unidad de superficie (mW/cm^2) como P_{Lmin} y concretar qué valor de y_0 es para el cual se alcanza esa potencia.

Para hallar la relación de $P_L - y_0$ se llevó a cabo un experimento. Se usará un fotodiodo sensible a la luz UV el cual tiene referencia OSD5.8-7Q. Este elemento genera una corriente al ser expuesto a la radiación la cual varía según la potencia lumínica UV que reciba.

Con base en esta funcionalidad, el experimento consistió en medir la variación de la intensidad que este diodo

generaba cuando se exponía a una fuente emisora de luz UV, en este caso, los LEDs de la placa de la insoladora. Después de realizar mediciones con varias alturas, los datos de intensidad obtenidos hay que transformarlos en unidades de potencia.

El montaje del experimento fue el siguiente: se usó la máquina de control numérico disponible en el laboratorio como sistema para controlar el rango de alturas para la cual se mediría la intensidad del fotodiodo. El uso de este aparato permitió un control muy exacto de la distancia entre LEDs y diodo ya que permite controlar el movimiento en el eje vertical con una precisión de 5 micras. Este montaje se puede ver en la figura 5-2.

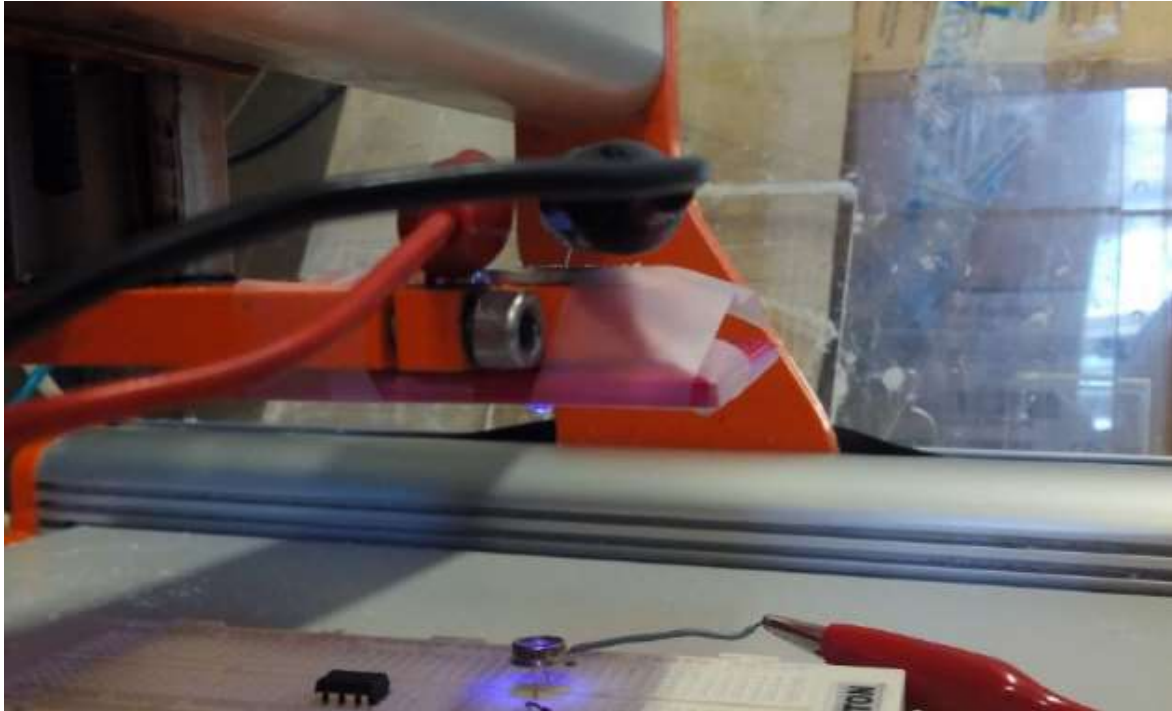


Figura 5-2. Montaje del experimento

Acoplando un LED al eje de la máquina CNC y disponiendo el fotodiodo en su vertical como se ve en la imagen 5-2 se pudo realizar este experimento. El LED estaba alimentado a una tensión de 3.3 V y el fotodiodo se conectaba con el amperímetro para medir la intensidad que por él pasaba.

Primero se realizó este montaje con un solo LED y luego se hizo con la placa completa de la insoladora y se varió la altura desde 1 cm hasta los 5 cm con la referencia del cero de la máquina en la cabeza del fotodiodo. Disminuyendo la altura desde la máxima a la mínima en pasos de 0.5 cm se fue midiendo y anotando la intensidad que se generaba lo que dio lugar a una serie de puntos. Adicionalmente se calculó un punto extra para el caso del montaje con la placa de LEDs, este punto fue con un valor de 9 cm. Estos valores de intensidad había que pasarlos a valores de potencia lumínica para poder trabajar con ellos.

Para realizar esta conversión, el fabricante del fotodiodo especifica los pasos a seguir en el datasheet del mismo. El primero paso es hallar el valor de *responsivity* del fotodiodo para una determinada longitud de onda; esta propiedad del diodo es la que mide la sensibilidad a la radiación UV del mismo para un determinado valor de la longitud de onda de la radiación. En este caso, como dicha longitud de onda es de 385 nm, la sensibilidad a la radiación ultravioleta es de:

$$\text{Responsivity} = 0.18 \text{ A/W}$$

Esta propiedad tiene unidades de intensidad partida de potencia y es una constante para cada valor de longitud de onda, por lo que si se conoce la intensidad que recorre el fotodiodo, se puede calcular la potencia que está recibiendo. Como dicha potencia depende de la superficie receptora de la radiación (en este caso la superficie del fotodiodo la cual es una placa fotosensible que genera la intensidad), para eliminar tal dependencia se expresará la potencia en unidades de mW/cm^2 dividiendo la potencia obtenida para cada distancia por la superficie receptora del fotodiodo la cual es una placa cuadrada de 2.4 mm de lado.

Después de aplicar dicha transformación a los puntos obtenidos en el experimento, se pudo obtener las gráficas representadas en la figura 5-2 las cuales representan los valores de P_L (mW/cm^2) frente a la distancia entre el LED o la placa y el fotodiodo.

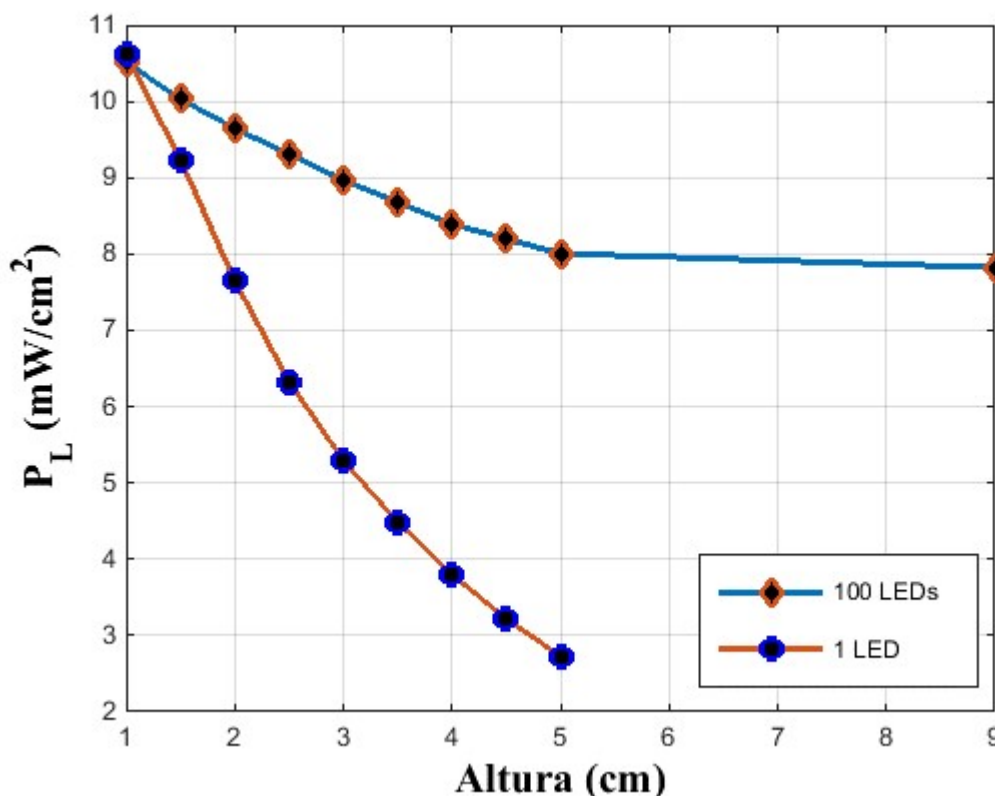


Figura 5-3. Dependencia de la potencia luminica con la distancia

Como era de esperar, la potencia disminuye conforme aumenta la distancia entre fotodiodo y placa.

Se aprecia que para una distancia pequeña de 1 cm, el valor de potencia es prácticamente la misma coincidiendo ambas curvas en el mismo punto, esto es debido a que debido a la proximidad entre la placa y el sensor la contribución de radiación UV en ambos casos es la misma, es decir, la generada por un solo LED el cual está en la justa vertical del sensor.

Cuando la distancia va aumentando ambas curvas se separan ya que la disminución de la potencia luminica medida en el caso de un solo LED es mucho más acusada que en el caso de la matriz completa. Esto es debido a que cuando se aleja lo suficiente la placa del sensor empiezan a contribuir los LEDs adyacentes al que está justo sobre la vertical del sensor ya que estos emiten luz en un cono de amplitud γ (ángulo de apertura) y la huella generada por cada lámpara se hace cada vez más amplia conforme aumenta la altura por lo que la radiación que recibe en este caso el fotodiodo es la suma de la generada por el LED que está en su vertical y la de los LEDs que están a su alrededor. Si se aumenta aún más la altura, mayor cantidad de huellas de LEDs entrarán sobre la superficie del receptor provocando que la disminución de la potencia tenga la curva que se representa en la figura 5-3

Un último comentario importante sobre esta gráfica es la evolución de la curva para 100 LEDs cuando se tienen grandes distancias. En este caso se realizó la medida de un punto con valor de altura de 9 cm el cual está representado en la figura 5-3. Se puede ver que la evolución desde los 5 cm hasta ese punto es casi nula, manteniéndose casi constante los valores de potencia luminica.

Esta gráfica se correspondía con la de la figura 5-4, la cual es procedente del artículo de la Referencia [1].

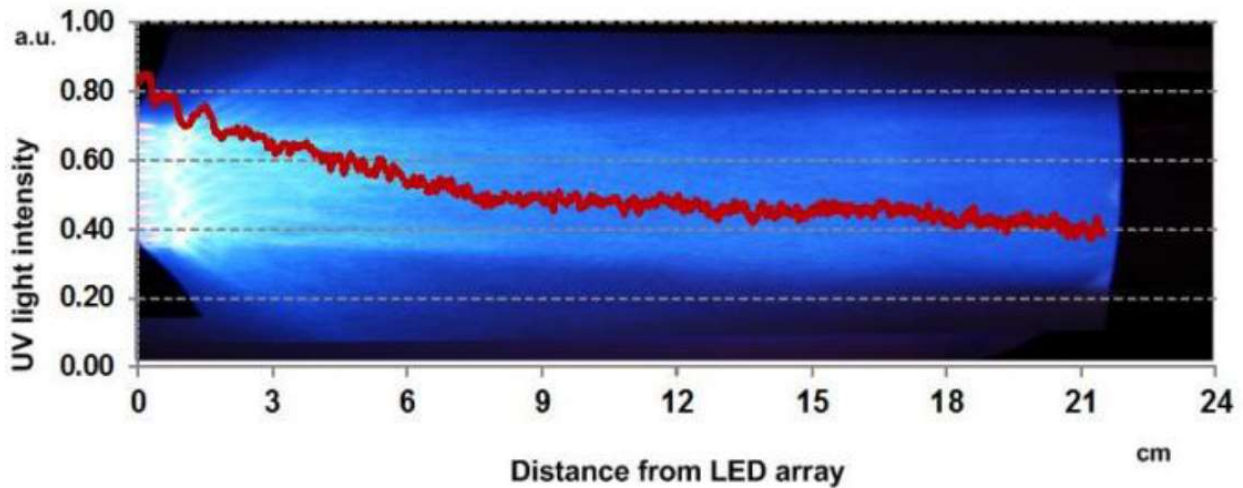


Figura 5-4. Variación de la intensidad lumínica con la distancia

En ella se ve que la variación de la potencia lumínica es similar a la que se ha representado en la figura 5-3 para el caso de la matriz de LEDs completa. Va disminuyendo hasta un valor de distancia el cual se hace casi constante.

Una vez calculada la curva que daba la evolución de la potencia lumínica de la placa en relación con la distancia entre placa y superficie fotosensible, quedaba fijar un valor de potencia de referencia para hallar el valor de distancia correspondiente a él y construir la configuración de la insoladora en relación a ello.

Para obtener el valor de referencia se usó la máquina alineadora. La idea fue que como esta máquina era capaz de generar microestructuras en una gran resolución y de una forma eficiente, mientras más parejo estuviera el diseño de la insoladora de LED con esta alineadora mayor seguridad se tendría en que el diseño era el correcto. Para ello se midió con el fotodiodo la potencia lumínica que la alineadora generaba sobre la superficie del sensor, y se obtuvo un valor de intensidad como se puede ver en la figura 5-5.

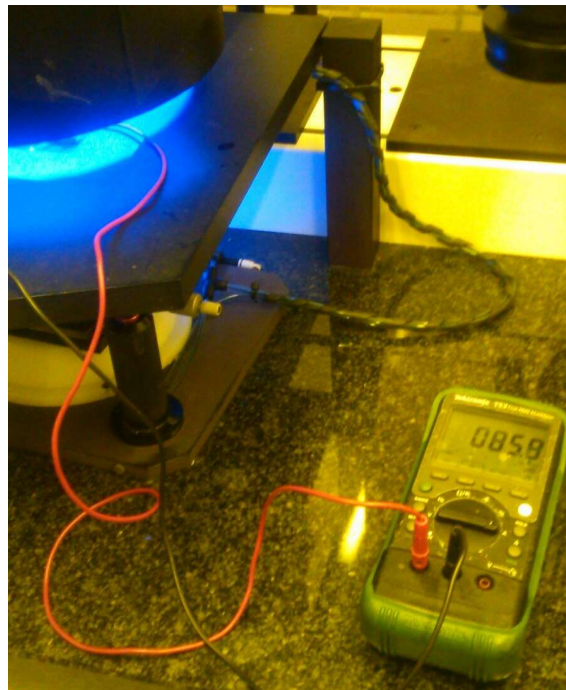


Figura 5-5. Medición de la potencia lumínica de la insoladora

El valor de esta medición fue de $85.9 \cdot 10^{-3} \text{ mA}$, el cual debía ser convertido en las unidades de potencia lumínica por unidad de superficie que se están utilizando.

$$0.18 = \frac{A}{W} \rightarrow W = \frac{A}{0.18}$$

$$I = 85.9 \cdot 10^{-3} \text{ mA} \rightarrow W = \frac{85.9 \cdot 10^{-3}}{0.18} = 0.4772 \text{ mW}$$

$$\text{superficie del sensor: } S_s = 2.4 \cdot 2.4 \text{ mm}^2 = 0.0576 \text{ cm}^2$$

$$\frac{W}{S_s} = \frac{0.4772}{0.0576} = 8.2851 \text{ mW/cm}^2$$

Por lo que, una vez obtenido este valor de P_L por unidad de superficie, faltaba hallar el valor de distancia para la cual la placa de la insoladora alcanzaba dicho valor. Se representó en los mismos ejes que la figura 5-3 la línea que correspondía a este valor de potencia y se hizo un zoom en la zona donde esta línea se cortaba con la curva correspondiente a los 100 LEDs como se puede ver en la figura 5-6.

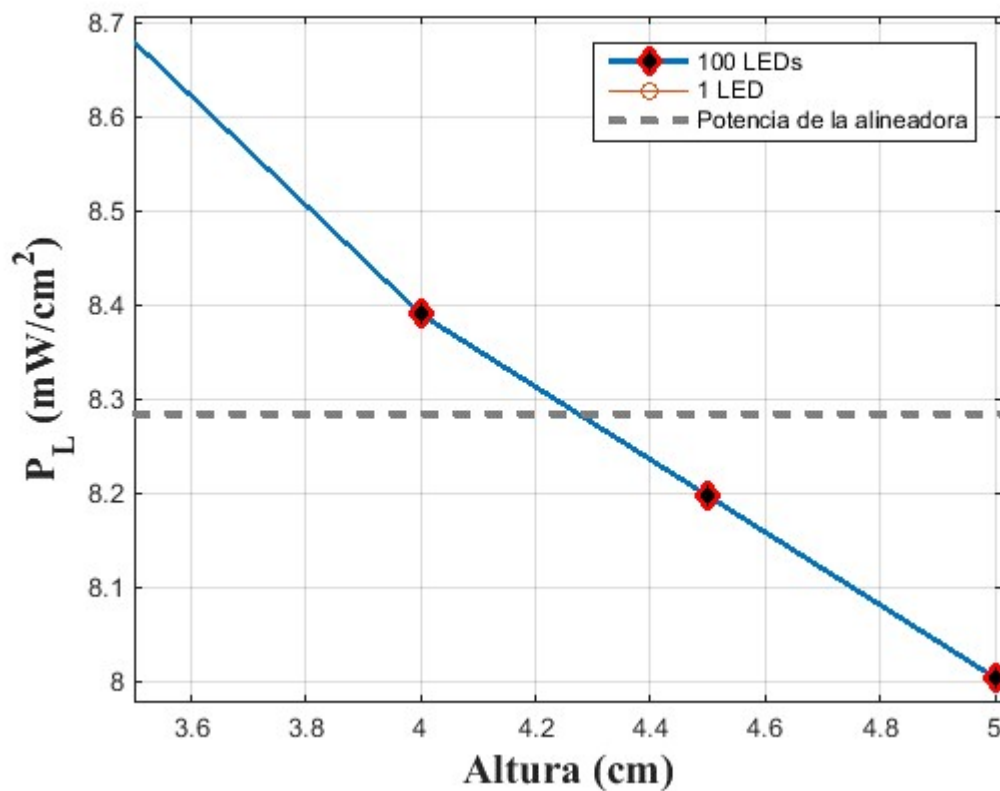


Figura 5-6. Cálculo de y_0

El punto de corte de ambas gráficas se encontraba entre próximo a una altura de 4.25 cm por lo que, se decidió que el valor fijado de la altura de insolación sería este.

$$y_0 = 4.25 \text{ cm}$$

Este parámetro es uno de los más importantes de la insoladora de este proyecto ya que determina la potencia luminosa que incide por unidad de superficie y esta tiene un valor aproximado de:

$$P_{L_0} = 8.3 \text{ mW/cm}^2$$

Se nombra esta potencia como potencia de referencia P_{L_0} a partir de ahora y será un valor base para los cálculos de los próximos apartados del presente capítulo ya que se resolverá el problema de la insolación con un ángulo

de giro de la placa y cuando ese ángulo sea nulo, se tendrá la potencia de referencia que se acaba de calcular.

El valor de la altura de insolación será un importante parámetro geométrico que determinará la dimensión vertical mínima del conjunto de la insoladora ya que se tiene que cumplir que la superficie sobre la que se apoye el PCB o la placa con resina deba estar a una distancia y_0 de los LEDs en el caso de que se vaya insolar con un ángulo de giro de la placa nulo.

5.1.2 Cálculo de la huella. Ángulo de insolación nulo

La huella de insolación es la superficie sobre la que incide la luz de los LEDs. Dicha huella tendrá una forma cuadrada debido a la forma escogida de la matriz de lámparas que se ha fabricado. El tamaño de dicha huella en el caso presente, (ángulo de insolación nulo) sólo dependerá de la distancia entre los LEDs y la superficie sobre la que inciden. Puesto que ya se ha calculado dicha distancia, se puede hallar los parámetros que conforman la huella.

Dichos parámetros serán Y_H y X_H que no será más que los lados de un rectángulo. Aunque en este caso ambos parámetros tengan el mismo valor y se podría definir un solo parámetro, se hace así para poder usar la misma definición en el mismo subapartado donde estas dos longitudes no coincidirán. La representación de la huella es la de la figura 5-7.

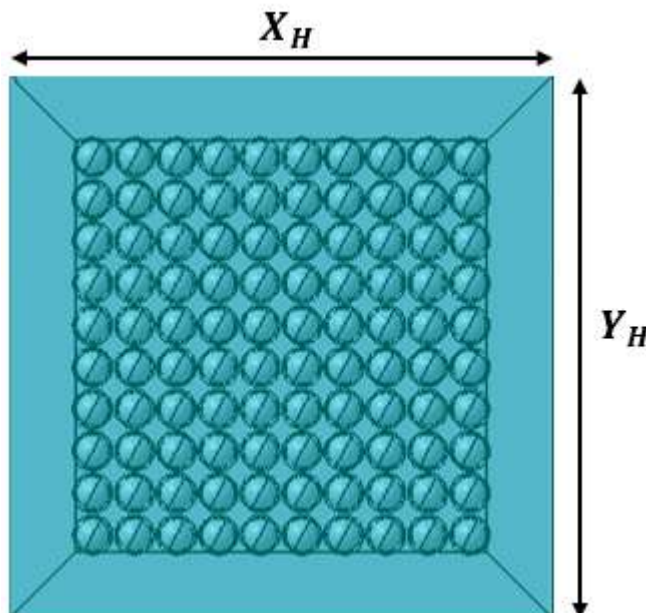


Figura 5-7. Forma y parámetros de la huella

Como se acaba de comentar, el cálculo de ambos parámetros es sencillo en este caso donde los LEDs se encuentran perpendiculares a la superficie a insolar y se tiene calculada la distancia de insolación.

Se define así un sencillo problema geométrico en la figura 5-8 que permite calcular el valor del lado del cuadrado que forma la huella.

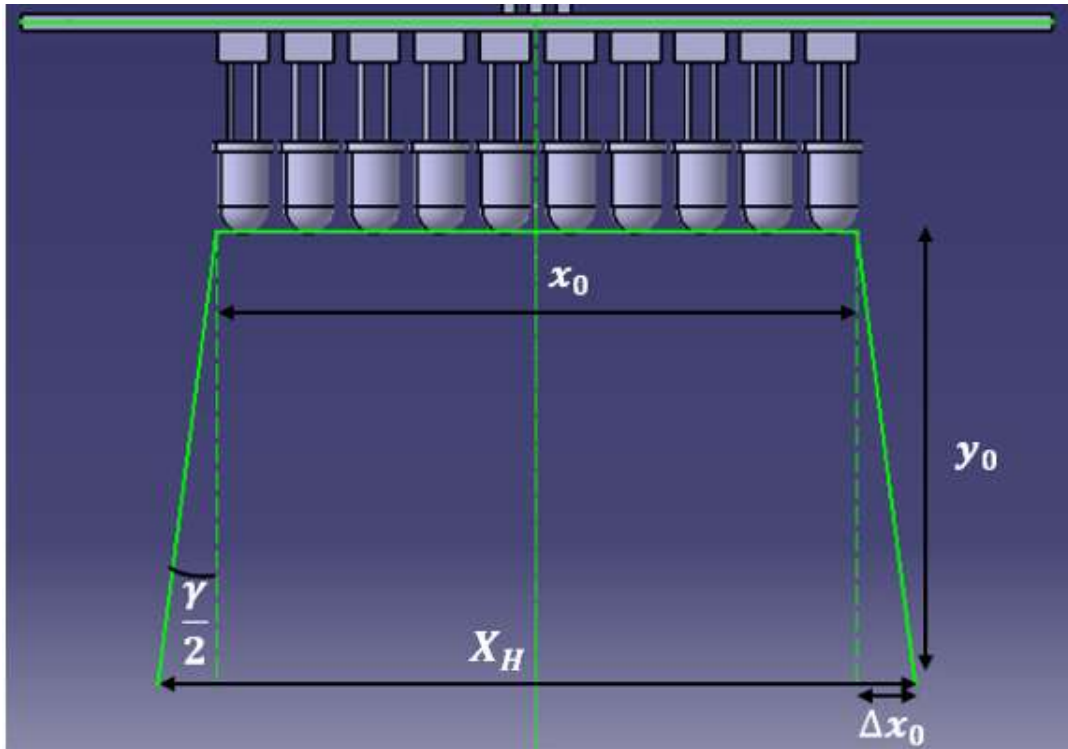


Figura 5-7. Cálculo de la huella

Se tienen los siguientes parámetros:

- y_0 altura de insolación, ya fijada de antemano y con un valor de 42.5 mm
- x_0 longitud de la matriz de LEDs. Es propiedad de la placa de la insoladora y vale 62.15 mm
- γ ángulo de apertura de los LEDs con un valor de 15°
- Δx_0 incremento de longitud debido a que existe γ
- Y_H longitud de la huella, parámetros a calcular en el problema

Geométricamente se tiene que:

$$\Delta x_0 = y_0 \cdot \tan\left(\frac{\gamma}{2}\right)$$

Por lo que, fácilmente se llega a:

$$Y_H = x_0 + 2 \cdot y_0 \cdot \tan\left(\frac{\gamma}{2}\right) = 62.15 + 2 \cdot 42.5 \cdot \tan\left(\frac{15}{2}\right) = 73.34 \text{ mm}$$

Con lo que la superficie de la huella será la siguiente:

$$S_H = Y_H \cdot X_H = Y_H^2 = (73.34 \text{ mm})^2 = 53.79 \text{ cm}^2$$

Esta es la superficie que determina el alcance de los LEDs para la altura de insolación fijada. Esta huella define la superficie que es insolada, la cual será un cuadrado de 73.34 mm de lado que recibirá la potencia lumínica que se ha calculado antes (8.3 mW/cm^2).

En el siguiente subapartado se resolverá el mismo problema pero con un ángulo impuesto en la placa de LEDs con respecto a la superficie a insolar.

5.1.3 Cálculo de la huella con un ángulo de insolación dado

Este apartado está destinado a calcular la posición de la huella en el caso de que los LEDs proyecten la luz UV sobre la superficie fotosensible con un ángulo específico respecto de ella. Esta propiedad es la que da un valor añadido a este diseño de insoladora ya que permitirá insolar microestructuras fuera del plano horizontal consiguiéndose complejas formas como las que se veía en la introducción al proyecto.

Ahora se plantea un problema que no es trivial como el del subapartado anterior y que requerirá usar unas aplicaciones geométricas más complejas y farragosas. Se parte de la base de la definición del problema tal y como se ve en la figura 5-8.

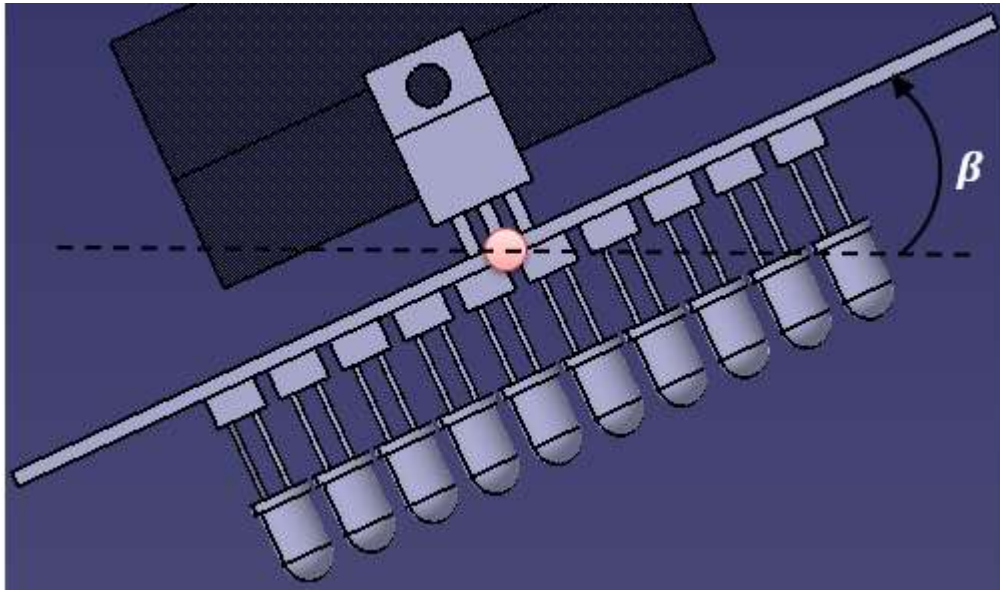


Figura 5-8. Definición del problema de la insolación con ángulo

El ángulo β será el parámetro protagonista de este apartado y será nombrado a partir de ahora como *Ángulo de insolación*. Este valor se define como el ángulo recorrido por la placa de LEDs al ser girada desde un eje situado en el centro del PCB que contiene el circuito de la placa de la insoladora, con el sentido positivo que se ve en la imagen 5-8 (de derecha a izquierda)

Este ángulo hará que ahora la huella pase a ser una superficie rectangular que dependerá de β variando su superficie total y su posición. Matemáticamente se puede describir tal dependencia:

$$S_H = S_H(\beta) = Y_H \cdot X_H(\beta)$$

Es decir, como la huella H se forma a partir de las dos longitudes de los lados, el lado que se define como Y_H no dependerá de β ya que el giro estará comprendido en el otro eje lo que hace que X_H varíe su tamaño y por lo tanto el valor de S_H .

En la figura siguiente se presenta de nuevo el problema presentado pero con los parámetros geométricos del mismo. Se ha añadido una nueva longitud que es necesaria para hallar la solución; esta es la distancia entre el eje de giro y el punto más alto de la bóveda de los LEDs el cual tiene un valor de $h_0 = 20 \text{ mm}$ ya que la placa de la insoladora se ha fabricado con esta dimensión. Estos parámetros se pueden ver en la figura 5-9.

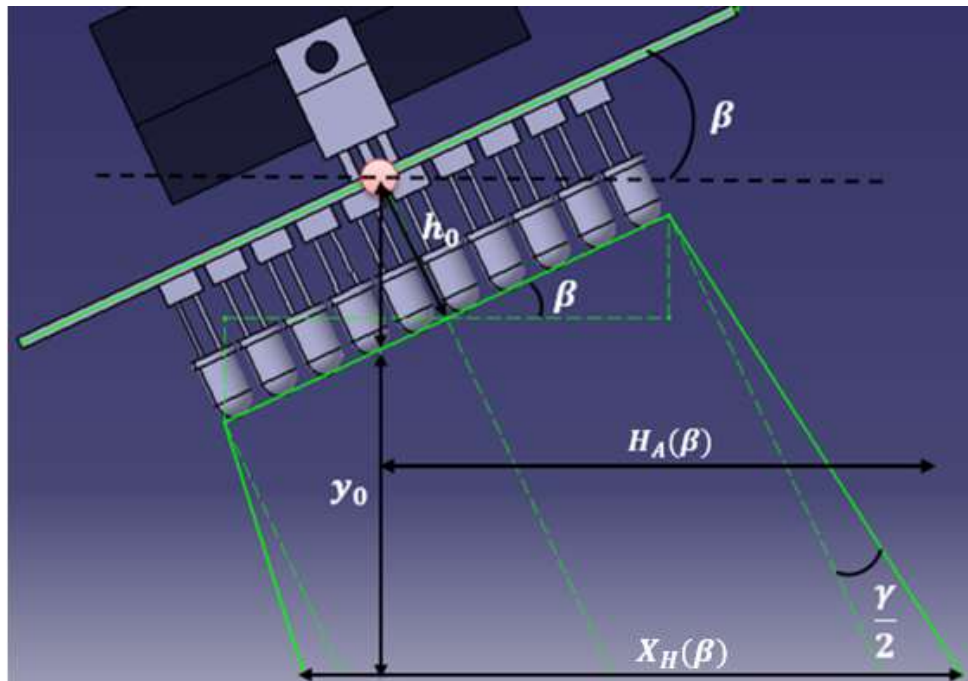


Figura 5-9. Parámetros que forman el problema

Entonces el problema planteado está formado por una variación geométrica de la huella de los LEDs en función del ángulo de insolación β . Se resolverá a partir de 3 triángulos que ayudarán a simplificar el problema y lo harán más visual. Estos tres triángulos se representan en la figura 5-10

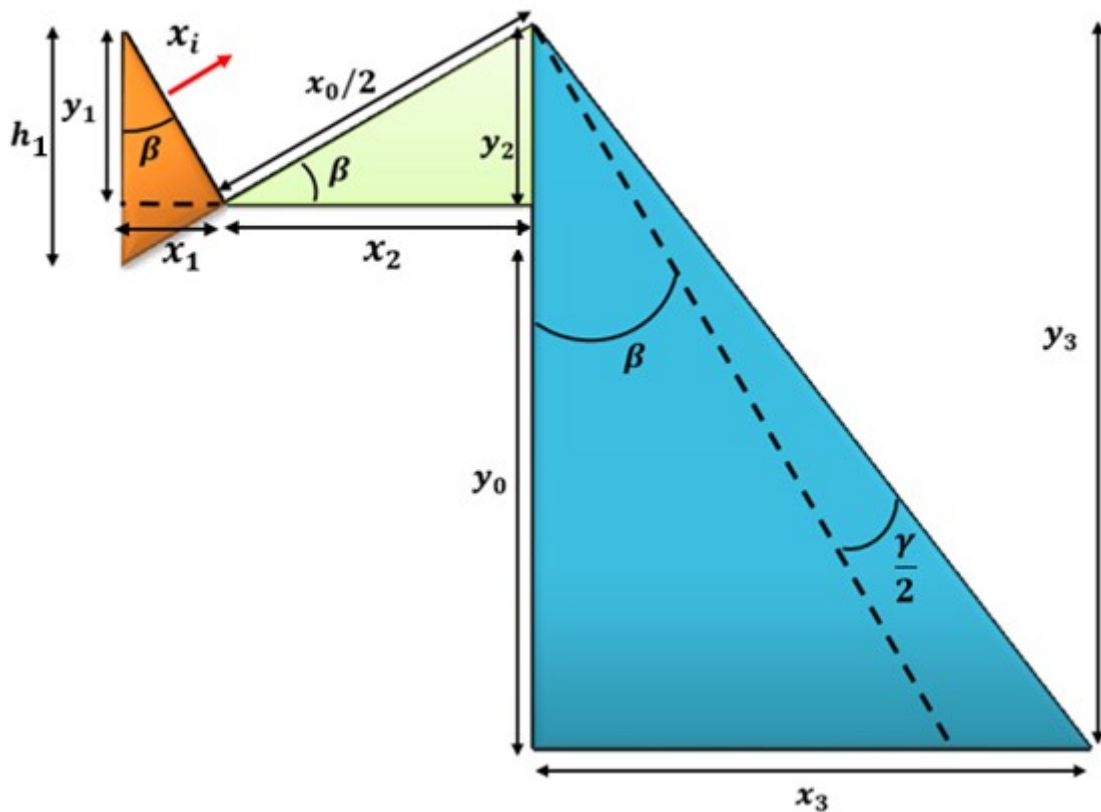


Figura 5-10. Triángulos del problema

Ahora se van a calcular dos parámetros importantes que son derivados de la huella de los LEDs.

- **H_A Alcance de la huella:** está representada en la figura 5-9 y se define como la distancia entre la línea vertical que pasa por el eje de giro de la placa y el punto más alejado de la huella. Con ayuda de las figuras 5-9 y 5-10, se puede ver que esta magnitud es igual a:

$$H_A = x_1 + x_2 + x_3 \quad (5-1)$$

De las figuras se obtiene:

- Triángulo naranja: $y_1 = h_0 \cdot \cos(\beta)$, $x_1 = h_0 \cdot \sin(\beta)$, $h_1 = h_0 / \cos(\beta)$
- Triángulo verde: $y_2 = x_0 / 2 \cdot \sin(\beta)$, $x_2 = x_0 / 2 \cdot \cos(\beta)$
- Triángulo azul: $y_3 = y_0 + (h_1 - y_1) + y_2$, $x_3 = y_3 \cdot \tan(\beta)$

Por lo que se tiene que el alcance de la huella será:

$$H_A = h_0 \cdot \sin(\beta) + \frac{x_0}{2} \cdot \cos(\beta) + y_3 \cdot \tan(\beta)$$

- **X_H Longitud de la huella:** Representada en la figura 5-9 y con el mismo significado que en el subapartado anterior. Para que se pueda calcular hacer falta definir otro triángulo más de similares características y se ha hecho en la figura 5-11.

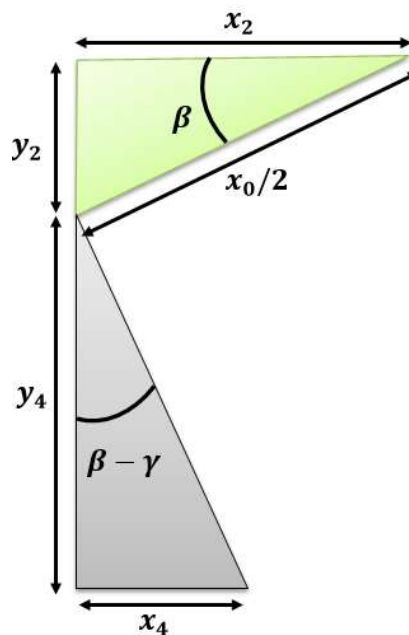


Figura 5-11. Triángulos del problema. Parte izquierda

Esta figura representa la otra parte del problema por lo que la unión de la figura 5-10 y la 5-11 es equivalente a la 5-9 pero se ha hecho así para facilitar la comprensión del problema. Los dos triángulos verdes son iguales.

Ya se puede definir entonces el ancho de la huella a partir de los triángulos de forma equivalente al cálculo del alcance de huella.

Se tiene entonces que, del triángulo gris:

$$y_4 = y_0 + h_1 - y_1 - y_2, \quad x_4 = y_4 \cdot \tan(\beta - \gamma)$$

Por lo que el ancho de la huella es el siguiente:

$$Y_H = x_3 + 2 \cdot x_2 - x_4 \quad (5-2)$$

Quedaba resuelto entonces el problema de la huella generada por la placa en el caso de que β tuviese un valor distinto de 0.

A continuación se va a representar la evolución de estos dos parámetros en función del ángulo β , pero antes hay que definir los valores de este ángulo. Puesto que la resina se curará en la dirección de la luz incidente, en base a la figura 5-12 se puede comentar que si se insola con un ángulo β , la resina tendrá un ángulo de $90^\circ - \beta$ medido desde la dirección contraria a β , como se puede ver en dicha figura

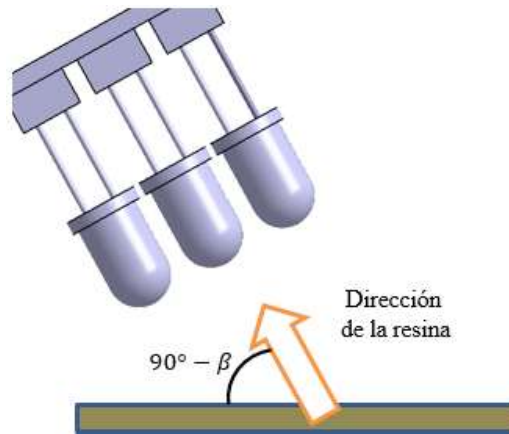


Figura 5-12. Dirección de la resina

Teniendo en cuenta esta idea, se decidió fijar el rango del ángulo de insolación el cual fue:

$$\beta = [-30^\circ, 30^\circ]$$

Lo que significaba que las microestructuras iban a poder tener un ángulo comprendido entre 60° y 120° . Valores muchos más altos de β podrían generar microestructuras más inclinadas pero posiblemente con menor calidad por eso se decidió fijar estos valores.

Por lo tanto, las representaciones de los dos parámetros antes calculados son las que se pueden ver en las figuras 5-13 y 5-14.



Figura 5-13. Alcance de la huella en función del ángulo de insolación

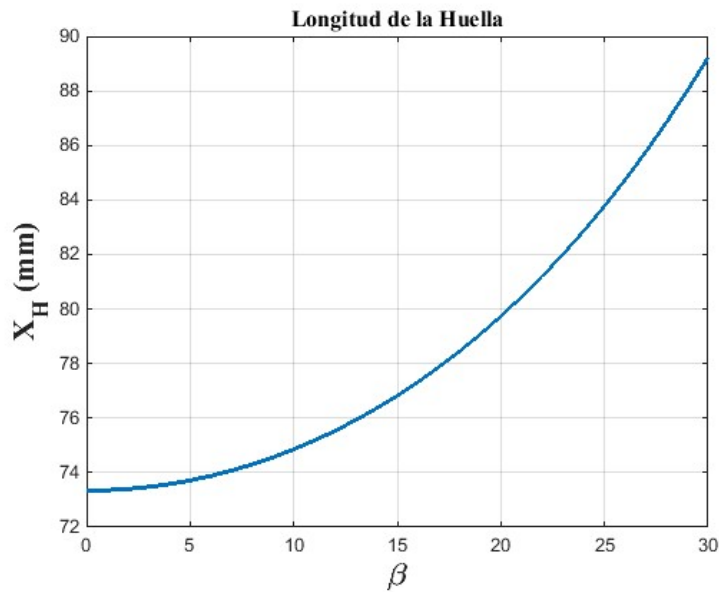


Figura 5-14. Longitud de la huella en función del ángulo de insolación

En ambas gráficas, para $\beta = 0^\circ$ se tienen los valores que se han calculado en el apartado 5.1.2 ya que los problemas son análogos. Pero cuando el ángulo de insolación empieza a aumentar su valor absoluto se tiene que tanto longitud de la huella como alcance de la huella empiezan a crecer de formas similares.

De la figura 5-13 se obtiene otro de los parámetros geométrico más importantes de la insoladora, para β_{max} que en este caso es de 30° el valor de H_A es exactamente de 85.88 mm . Es decir, que si se sitúa la placa en el centro de referencia y se gira 30° respecto a su eje, la luz de los LEDs alcanzaría una distancia de 85.88 mm desde el centro de referencia. La importancia de este resultado recae en que si se quiere insolar con el ángulo máximo, el fotolito y la superficie fotosensible se podrá posicionar hasta esa distancia con respecto al centro lo que implica, que la caja que alberga la placa de la insoladora y la superficie que soporta el material a insolar deberá tener las dimensiones suficientes para que se pueda realizar la insolación en este caso. En otras palabras, la caja de la insoladora deberá tener longitud suficiente para albergar la posición completa de la huella en el caso de que el ángulo de insolación sea el máximo permitido.

$$H_{Amax} = 85.88 \text{ mm}$$

En cuanto a la figura 5-14, esta determina la longitud de la huella y por tanto el largo del PCB o placa de resina que se puede insolar. Mientras mayor sea el ángulo de insolación, mayor será la superficie de la huella. Para el caso de fabricación de PCBs es una ventaja ya que permite aumentar la superficie a insolar, pero cuando se quiera fabricar estructuras de SU-8, las dimensiones máximas de la placa de resina vendrán determinada por el ángulo que se quiera fabricar. El valor máximo de la longitud de huella es de 89.23 mm lo que significa que la superficie máxima de la huella será:

$$S_{Hmax} = Y_H \cdot X_{Hmax} = 73.34 \cdot 89.23 = 65.44 \text{ cm}^2$$

Otro resultado importante que se puede obtener de estos desarrollos, es el cálculo de la distancia existente entre la fila de LEDs que está más próxima y más lejana de la placa que se está insolando. Esto es fácil de calcular ahora que se tienen las expresiones de los triángulos que resuelven el problema geoméricamente. Para calcularlo en función de β tan sólo se usarán los triángulos más exteriores, los cuales son el azul de la figura 5-10 y el gris de la figura 5-11.

La distancia mínima que la luz recorrerá desde la placa de LEDs hasta la superficie fotosensible es equivalente al valor de la hipotenusa del triángulo gris, el cual es formado por la fila más próxima de LEDs si se tiene un ángulo de insolación positivo.

En el caso de la distancia máxima de insolación, esta vendrá dada por la hipotenusa del triángulo azul. En este

caso es equivalente a la luz procedente de la fila más lejana a la superficie.

De esta forma, se puede definir una función de distancia máxima y mínima de insolación en función del ángulo, dichas funciones son $d_{max}(\beta)$ y $d_{min}(\beta)$ y tiene el valor de la siguiente expresión:

$$d_{max}(\beta) = \frac{x_3}{\text{sen}(\beta + \gamma)} \quad d_{min}(\beta) = \frac{x_4}{\text{sen}(\beta - \gamma)} \quad (5-3)$$

La representación de estos parámetros es la mostrada en la figura 5-15.

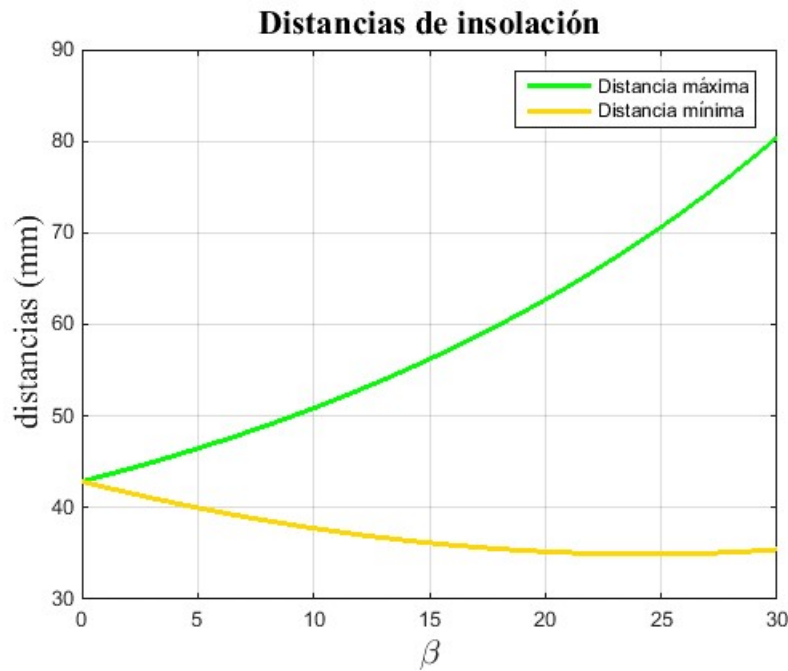


Figura 5-15. Distancia de insolación en función de β

Como se puede ver, la distancia máxima crecerá de forma más rápida que la forma en que decrece la distancia mínima. Para conseguir una idea de la importancia de estas distancias, es necesario saber a qué valor de potencia lumínica por unidad de superficie se corresponden.

La distancia máxima es $d_{max}(\beta = 30^\circ) = 80 \text{ mm}$, y como la potencia lumínica desciende conforme aumente la altura, se conseguirá la potencia mínima por unidad de superficie que es capaz de dar los LEDs de la insoladora. Su valor se obtiene de la figura 5-3 y es el siguiente:

$$P_{Lmin} = 8 \text{ mW/cm}^2$$

Esta es la parte en la que la gráfica se hace casi constante por lo que la potencia habrá alcanzado un valor mínimo y disminuirá muy lentamente.

En cuanto a la distancia mínima, se tiene que $d_{min}(\beta = 30^\circ) = 35 \text{ mm}$ lo que se corresponderá con el valor de potencia lumínica máxima de la insoladora, que según la gráfica 5-3 es:

$$P_{Lmáx} = 8,681 \text{ mW/cm}^2$$

Estos resultados permiten caracterizar el rango de valores de potencia lumínica por unidad de superficie que la insoladora alcanza. Si se quisiese obtener un valor fijo potencia dentro de ese rango, se podría fijar el ángulo de insolación, esto podría ser útil en el proceso de fabricación de microestructuras, en los que pueden requerirse calcular de forma muy precisa todos los parámetros de la insolación, entre ellos, la potencia lumínica que recibe la resina.

Como se puede ver, el valor de potencia mínima de insolación que se usó en el subapartado 5.1.1 para calcular la altura mínima de insolación ha quedado obsoleto debido a la resolución del problema de insolación con ángulo, sin embargo la potencia de este primer apartado ha servido como base para todos los cálculos posteriores. De hecho, para $\beta = 0^\circ$ se ha conseguido obtener la misma potencia lumínica que la alineadora que se ha usado de referencia por lo que con esto se ha podido concretar que el objetivo fundamental del proyecto se ha alcanzado. Se ha conseguido entonces obtener una adaptación de la alineadora con el mismo valor de potencia lumínica pero utilizando tan sólo una placa de 100 LEDs.

Una vez se han resuelto los problemas geométricos de la insoladora y se ha asegurado que la altura que se ha fijado de insolación es la correcta se puede proceder a fabricar el resto del conjunto de la insoladora, donde irá instalada la placa de los LEDs. En el siguiente subapartado estará el resto del diseño mecánico donde se parte de los cálculos que se acaban de realizar y se diseñan los elementos necesarios para configurar la insoladora e integrar todas sus funciones.

5.2 Diseño de las piezas de la insoladora

En este capítulo se trata el diseño de las partes de la insoladora que no son la placa de LEDs o el temporizador. De la necesidad de que la matriz de LEDs necesita un medio sobre el que apoyarse e insolar, nace la idea de construir un objeto que cumpla la función de soporte. Además, para conseguir que la fuente de luz tenga un ángulo con respecto a la superficie a insolar, se requiere una configuración mecánica determinada.

En este capítulo se va a desarrollar el diseño de todas las piezas que permiten a la matriz de LEDs insolar de forma adecuada. Los elementos se dibujarán en 3D mediante el software Catia V5 y luego serán impresos usando una impresora 3D Bq Prusa i3.

La decisión de conseguir todos los elementos mediante impresión 3D está motivada por el amplio número de posibilidades en cuanto al diseño y fabricación, ya que con esta tecnología se podían hacer cosas complejas con poco esfuerzo y una gran precisión puesto que no hacía falta fabricarlas manualmente, sino tan solo diseñarlas en 3D. El material usado es el procedente de una bobina de cable plástico el cual es fundido por la impresora 3D y extrusionado en forma de hilo para formar las figuras programadas; la forma de impresión es bastante potente, ya que se hace de tal forma que las piezas no son completamente macizas, a partir de un cierto espesor desde la superficie, se comienza a imprimir un mallado en el interior de la pieza que hace que su densidad sea reducida enormemente pero se mantienen las propiedades mecánicas. Además, el coste de fabricación es muy reducido, lo que hacía una opción más que aconsejable el uso de estos materiales y tecnología para la fabricación de la insoladora.

En lo que resta de apartado, se irán comentando en detalle cada una de las piezas fabricadas, indicando las justificaciones pertinentes en cuanto a su diseño y la función que desempeña dentro del conjunto de la insoladora.

Para la impresión en 3D hay que tener en cuenta que las piezas sufren una expansión durante su fabricación, consiguiéndose que las cotas reales obtenidas sean algo mayor que las del diseño, por eso muchas de las cotas tienen una determinada tolerancia en cuanto al montaje de una pieza con otra. Aparte de esto, se ha tenido en especial cuidado la forma en la que la impresora fabrica las piezas. Lo hace por superposición de capas, comenzando desde la base de la impresora, por lo que todos los diseños tienen una parte plana sobre la que ser fabricados evitando que se tengan partes en el aire que podría suponer un problema a la hora de su impresión.

Las pieza que se van a presentar ahora no vendrán acotadas, a excepción de alguna dimensión explicativa, pero en el Anexo III se podrán ver las dimensiones más importantes de las piezas de mayor interés para el diseño de la insoladora.

5.2.1 Coat de los LEDs

Anteriormente se ha comentado la necesidad de instalar a los LEDs unas determinadas piezas opacas alrededor de su superficie lateral para evitar pérdidas lumínicas y mejorar la colimación de rayos. Como se adelantó en un capítulo anterior, se comenzó utilizando un cilindro de material termorretráctil del mismo diámetro que el LEDs. Esta configuración era funcional, ya que cumplía con su propósito, pero tenía un amplio margen de mejora.

Aparte de que era complicado cortar cada cilindro con la longitud requerida, cuando se instalaron las 100 caperuzas sobre los LEDs, se observó que la disposición de los mismos era muy irregular, teniéndose LEDs girados y desplazados unos respecto a otros lo que podría traer problemas a la hora de la insolación ya que la huella proyectada iba a ser no uniforme. Por lo que era necesario mejorar la forma de cubrir los laterales de los LEDs.

La solución obtenida fue la de fabricar una estructura cuadrada repleta de taladros para que encajase cada LEDs en el suyo correspondiente, dándole así mayor rigidez y regularidad a la matriz de luz además de conseguir las mismas ventajas que con el cilindro fabricado en termorretráctil.

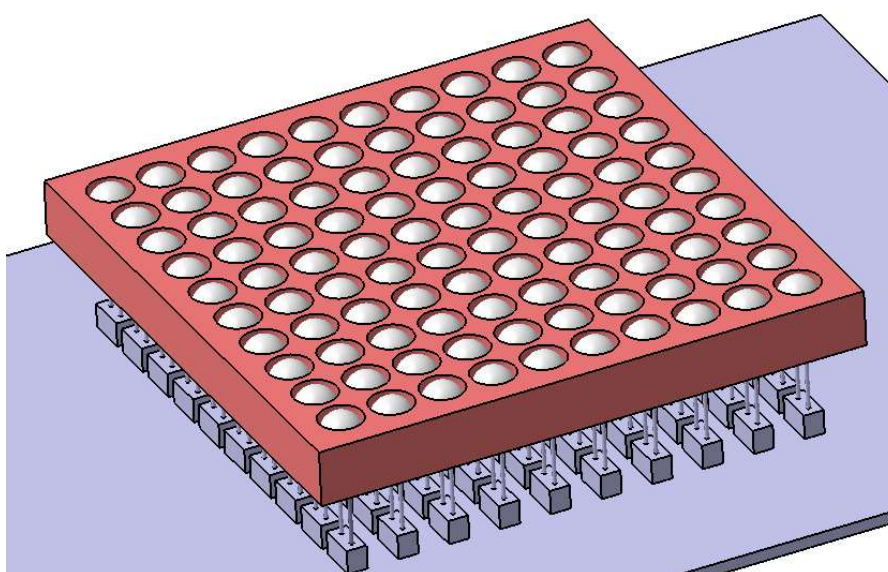


Figura 5-16. Estructura que cubre los LEDs

5.2.2 Sistema de control de ángulo de insolación

Para conseguir que se pudiese insolar con un ángulo determinado se debía fabricar un mecanismo de giro. Este debía ir acoplado a la placa e instalado sobre el soporte de la insoladora. El sistema de control del ángulo de insolación se compuso de 2 mordidas que sujetan la placa de LEDs y 2 engranajes que hace que las mordidas giren sobre un eje que sería instalado en la caja de la insoladora.

- Mordidas de sujeción. Compuestas por un bloque con una ranura para introducir el PCB más un eje de giro, serían las piezas que se taladrarían a la placa de LEDs para ajustarse a ella mediante un tornillo dándole fijación y permitiendo el giro de la misma de manera uniforme, ya que al intentar conseguir un modelo compacto, se ha ajustado mucho en el dimensionado de la estructura de la insoladora, es por esto que se han realizado los cálculos del apartado 5.1, así que la huella después de un giro β debía ser tal y como dictan los resultados de esos cálculos.

Una de las dos mordidas presenta dos ranuras para el ajuste con una de las ruedas dentadas, como se puede ver en la figura 5-17. Los ejes de las dos sujeciones debían de ser coincidentes para un correcto giro de la matriz de LEDs y el ancho de la ranura se fabricó de un tamaño mayor que el espesor de la placa (1.5 mm) teniendo en cuenta que la impresora 3D por lo general expandía las piezas. Los taladros que se hicieron fueron de 3 mm de diámetros para ajustar un tornillo, una tuerca y dos arandelas del

mismo diámetro. La longitud de los ejes era tal que irían instalados sobre dos taladros en la caja de LEDs y sobrepasarían la superficie de la misma

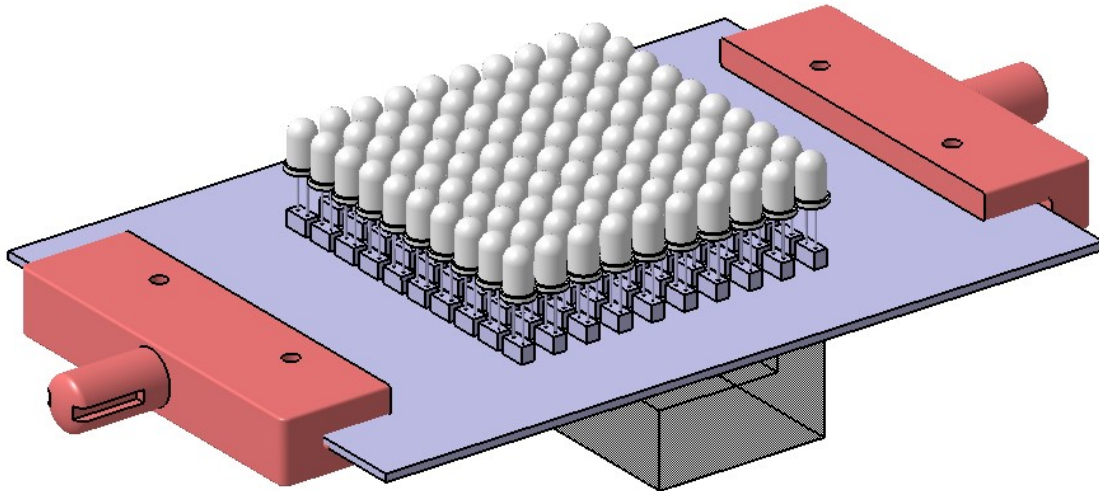


Figura 5-17. Mordidas de la placa

- Par de engranajes

Se compone de dos ruedas dentadas, una que va acoplada sobre la mordida con ranuras y otra que va atornillada a la caja de la insoladora. De esta manera se conseguía controlar el giro de la placa de LEDs entre los valores de -30° y 30° tal y como el diseño lo exigía

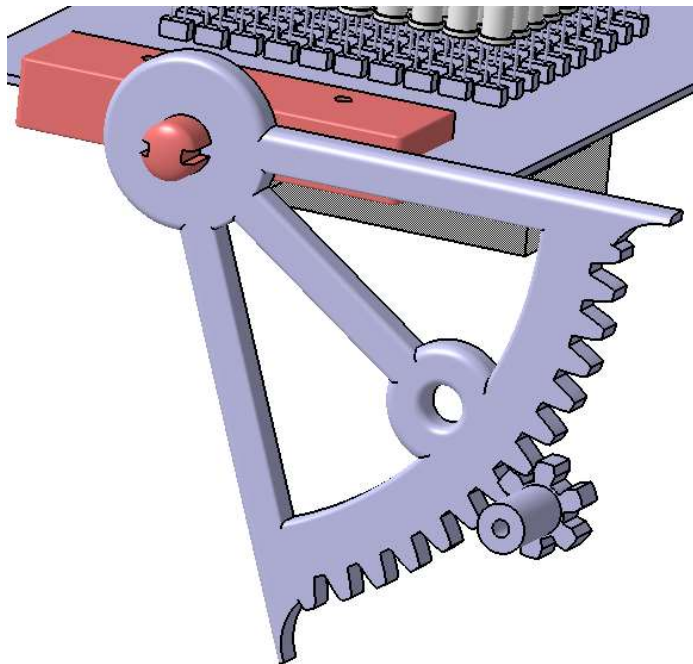


Figura 5-18. Ruedas dentadas

La rueda que se ajusta a la mordida es la que tiene un mayor tamaño. Tiene 13 dientes los cuales forman 12 valles entre ellos que equivalen a 5° , por lo que cada diente desplazado con la rueda pequeña, moverá la placa un ángulo igual a 5° , tanto en una dirección como en otra, consiguiéndose así los valores angulares que se había concretado en el diseño.

Como detalle se puede comentar que la forma del engranaje grande ha sido pesada para usar el círculo próximo a los dientes como herramienta de marcado de los ángulos con los que se posiciona la placa.

La idea es dibujar sobre la superficie de la caja el arco de valores alcanzados y cada vez que el engranaje se mueva, dicho círculo se posicionará sobre el valor correspondiente

En cuanto a la rueda pequeña, se puede comentar que esta va instalada sobre el soporte de la insoladora a través de un tornillo que atraviese su longitud y el espesor de dicho soporte.

En la figura 5-19 se puede ver en detalle el acoplamiento entre los engranajes y la mordida, así como el aspecto que presentan los dientes de las ruedas dentadas

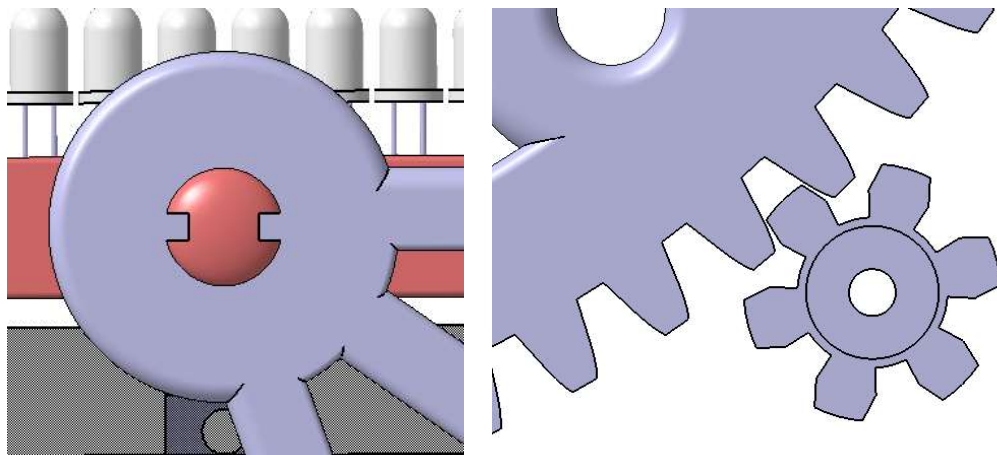


Figura 5-19. Detalles del mecanismo de giro de la placa

5.2.3 Caja soporte de la insoladora

Después de la matriz de LEDs, este es el elemento más importante. Es el que da soporte a la misma y permite el acoplamiento de los demás elementos y le da la estructura a la insoladora

Se ha diseñado ajustando en la medida de lo posible las dimensiones, utilizando para el dimensionado el dato del alcance de huella como valor de longitud máxima de la planta de la insoladora. Aparte, al ser la pieza más grande y visible del conjunto, la estética ha tenido un gran peso a la hora de definir su forma.

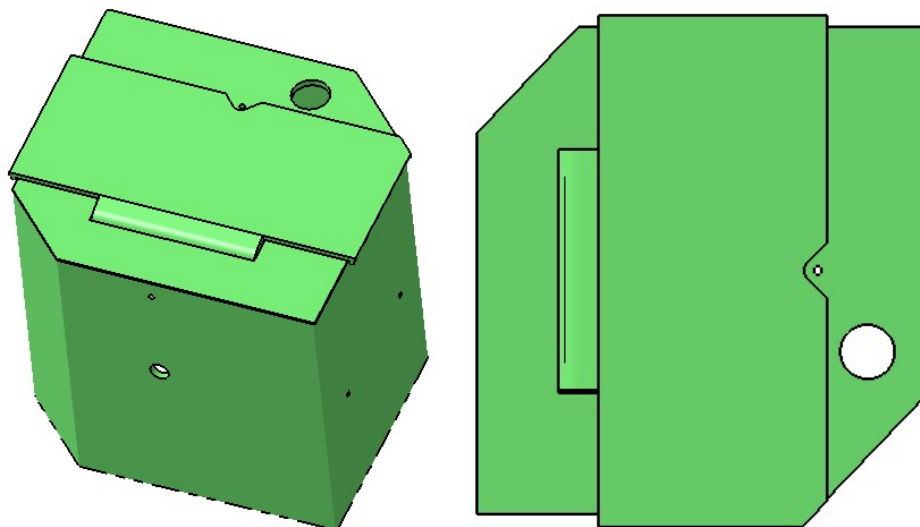


Figura 5-20. Caja. Vistas 1 y 2

Se puede ver que tiene forma de prisma recto con base rectangular a la que se le ha hecho dos chaflanes en dos aristas con motivos estéticos y para ahorrar material en la medida de lo posible.

Los dos taladros paralelos situados en la cara de la derecha de la vista 1 de la figura 5-20 son para el acoplamiento de la placa del temporizador, la cual irá en posición vertical y anclada con dos tornillos

El taladro de mayor diámetro de la cara frontal es el eje de giro de la placa, dentro de este hueco irán instalados los ejes de las mordidas.

Tiene una tapadera compuesta por 3 piezas. Dos fijas, las cuales se acoplan a la estructura central de la caja mediante dos taladros en sus laterales. La otra pieza es móvil y es acoplada a una de las otras dos mediante un eje lo que la permite funcionar como tapadera. Debajo de esta pieza se encuentra justo la superficie donde la huella es proyectada y la función de esta tapadera es permitir el acceso a dicha superficie para situar las obleas que se quieren insolar. Cuando se vaya a insolar será cerrada evitando así que los rayos ultravioleta escapen de la caja.

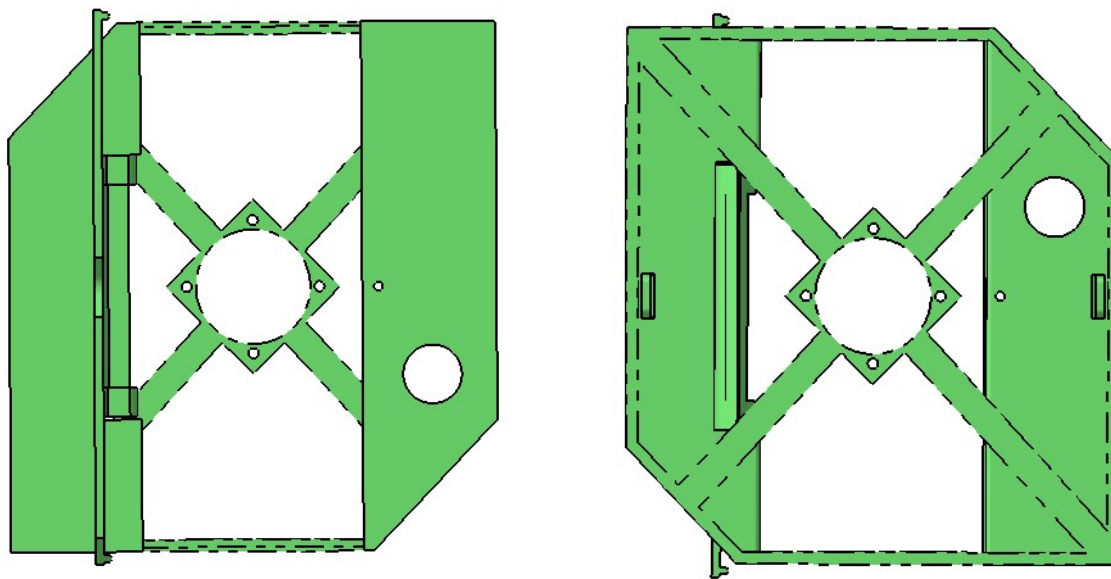


Figura 5-21. Caja. Vistas 3 y 4

La tapadera se abre un ángulo de casi 90° y deja ver el interior de la caja. Dentro de ella va montada la placa de LEDs y la del temporizador. Así como el policarbonato sobre el que se apoya la oblea.

El taladro de mayor diámetro de la caja es el hueco para instalar el pulsador que activa el temporizador. Se ha situado en este lugar ya que es de fácil acceso haciendo aún más sencillo el proceso a seguir para utilizar esta máquina para la insolación, tan sólo hay que situar los engranajes, situar la oblea sobre el policarbonato, cerrar la tapa y luego presionar el pulsador adyacente.

El otro taladro más pequeño es para el acoplamiento del policarbonato que soportará la oblea durante la insolación. Dicho policarbonato será un rectángulo con una solapa para el taladro. Se puede ver en la figura 5-22 como estaría sobre la caja. Depende del ángulo de insolación escogido, la huella estará en unas zonas u otras de esta superficie, siendo necesario indicar el sitio exacto de la misma para posicionar la oblea correctamente.

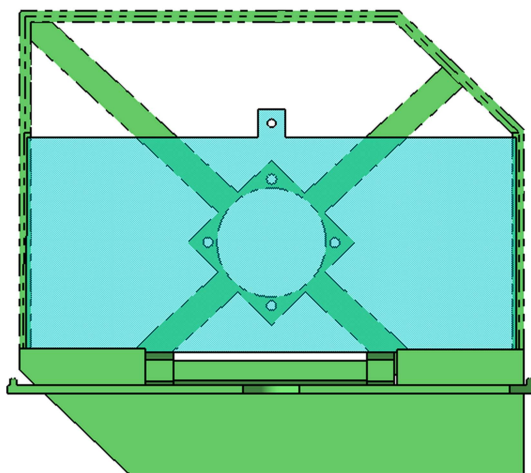


Figura 5-22. Detalle de la pieza de policarbonato

La base de la caja es hueca con un soporte en forma de aspa que llega desde 4 de los lados, como se puede ver en la figura 5-21. El soporte central de la base de la caja es un espacio destinado a la instalación de un ventilador de refrigeración. Con el uso actual que se le da a la insoladora, todo el calor es disipado por la aleta instalada en el regulador, pero en el caso de que se quisiese dar un uso más pronunciado de la insoladora, aumentando el tiempo que los LEDs están encendidos, puede llegar el caso en el que dicha aleta esté sobrecalentada y no sea suficiente. En este caso sería aconsejable la instalación de un pequeño ventilador con unas dimensiones de $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ el cual iría montado en ese soporte.

La razón por la que la base es casi hueca es para ahorrar material en la fabricación de la caja y además favorecer el flujo de aire dentro de la misma para que no se den problemas de sobrecalentamiento de los componentes electrónicos o de la resina.

Realizando el montaje completo de todos los elementos comentados se podrá obtener una vista general del aspecto de la insoladora de este proyecto. En las próximas figuras serán representadas varias vistas adicionales con el montaje completo, y la caja será traslúcida para permitir ver el interior de la misma.

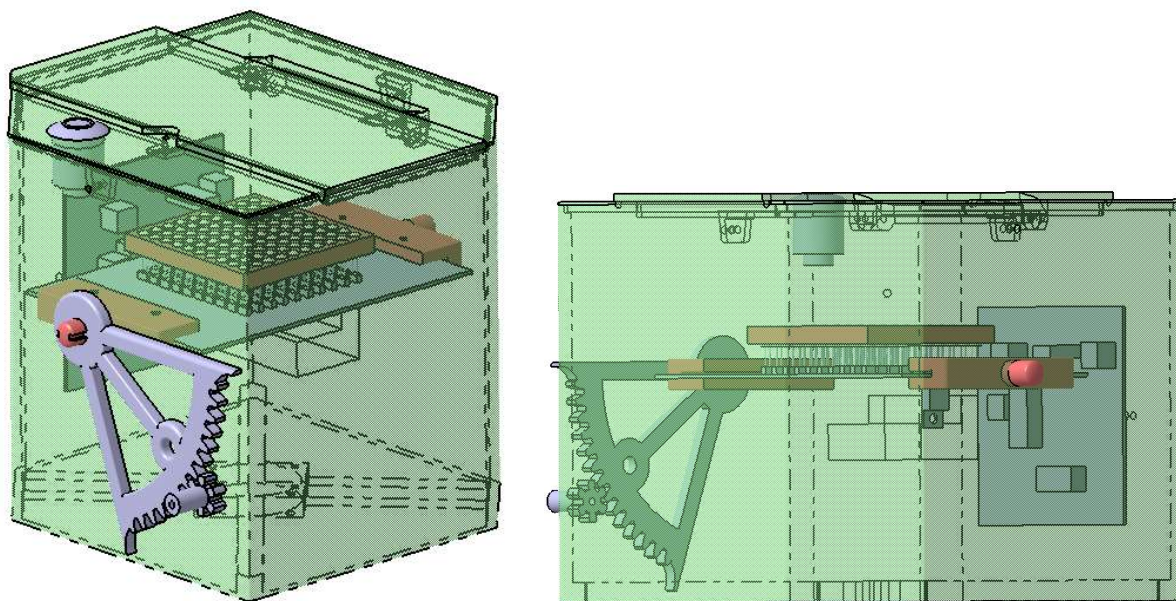


Figura 5-23. Caja. Vista 5 y 6

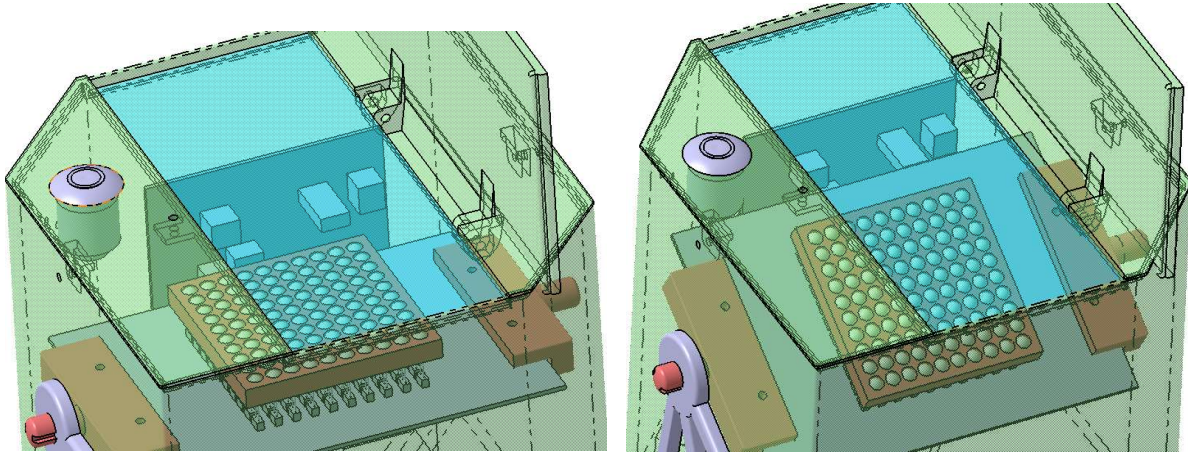


Figura 5-24. Caja. Vista 7 y 8

En la figura 5-24 se puede ver la configuración que se tendría con un ángulo $\beta = 30^\circ$, en el engranaje es girado y hace que la placa gire a través de las mordidas.

El pulsador que se ha comentado antes iría montado según esa posición y el temporizador quedaría al lado de la placa de LEDs.

La superficie interior de la caja es de $172\text{ mm} \times 158\text{ mm}$ donde la cota de 172 mm es la obtenida en el apartado anterior a partir del alcance de la huella y los 158 mm se debe a la longitud de la placa con las dos mordidas acopladas.

Se cierra así el capítulo del diseño mecánico de la insoladora. Todas las piezas descritas han sido imprimida y ensambladas correctamente lo que permite el uso de la insoladora de una manera sencilla y útil.

Se ha conseguido un diseño compacto donde se han integrado todos los elementos necesarios para el funcionamiento de la placa además del sistema de control del ángulo, el cual permite cumplir el objetivo de insolar microestructuras inclinadas.

Después de varias horas de impresión en 3D, el resultado es el que se puede ver en la figura 5-25

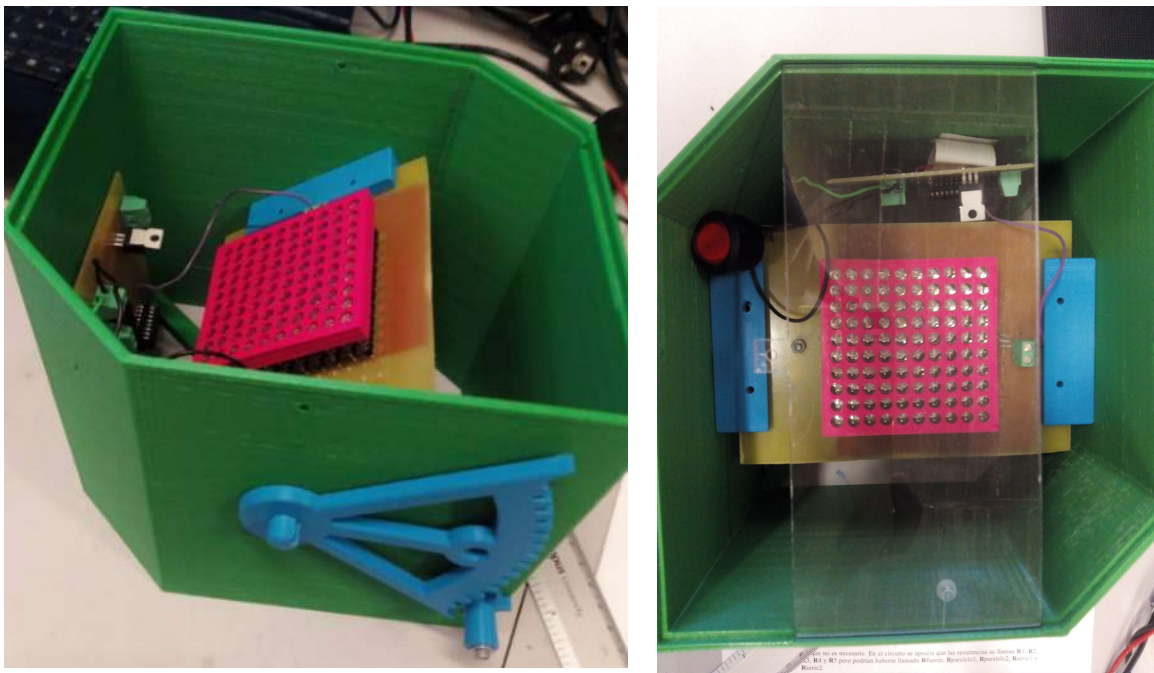


Figura 5-25. Montaje insoladora

6 EXPERIMENTOS Y PRUEBAS

Después de haberse completado el diseño y haberse obtenido la insoladora, se procedió a realizar pruebas de insolado con ella para tener la certeza de que se habían cumplido los objetivos principales del proyecto.

Los experimentos llevados a cabo se pueden diferenciar en dos tipos, insolado de PCBs e insolado de microestructuras de resina SU-8. Los procesos son por lo general, muy distintos entre sí, aunque comparten rasgos comunes como se ha explicado en la introducción del presente documento.

6.1 Insolación de PCB

Esta es la función básica de una insoladora, ser capaz de generar circuitos impresos. En este caso se experimenta con PCBs de cobre con un espesor de $35\ \mu\text{m}$ y de $70\ \mu\text{m}$ dependiendo del caso.

Puesto que para que los PCBs no es necesario conseguir formas inclinadas, todas las insolaciones que se hicieron aquí fueron para $\beta = 0^\circ$, lo que significaba que la altura de insolación era de $42.5\ \text{mm}$.

Una vez que se insolaban las placas, había que revelarlas. El revelador usado era el que se puede ver en la figura 6-1



Figura 6-1. Revelador de PCB

Después del revelado por el que se disolvía la capa superficial de resina de la oblea, se aplicaba el líquido atacador para eliminar el cobre sobrante y dejar al descubierto las pistas del circuito.

Se recuerda que dicho líquido atacador está compuesto por un 25 % de agua oxigenada, 25 % de aguafuerte y 50 % agua consiguiéndose un ácido que reaccionaba con el cobre disolviéndolo.

Lo buscado a la hora de realizar los experimentos era conseguir una referencia del tiempo que necesitaba esta insoladora para insolar placas de PCB, así como la calidad en la que lo hacía.

Para ello, se consiguió un fotolito aleatorio, compuesto por pads circulares de $1.5\ \text{mm}$ de diámetros y pistas con un ancho de $0.40\ \text{mm}$. Este fotolito se puede ver en la figura 6-2.

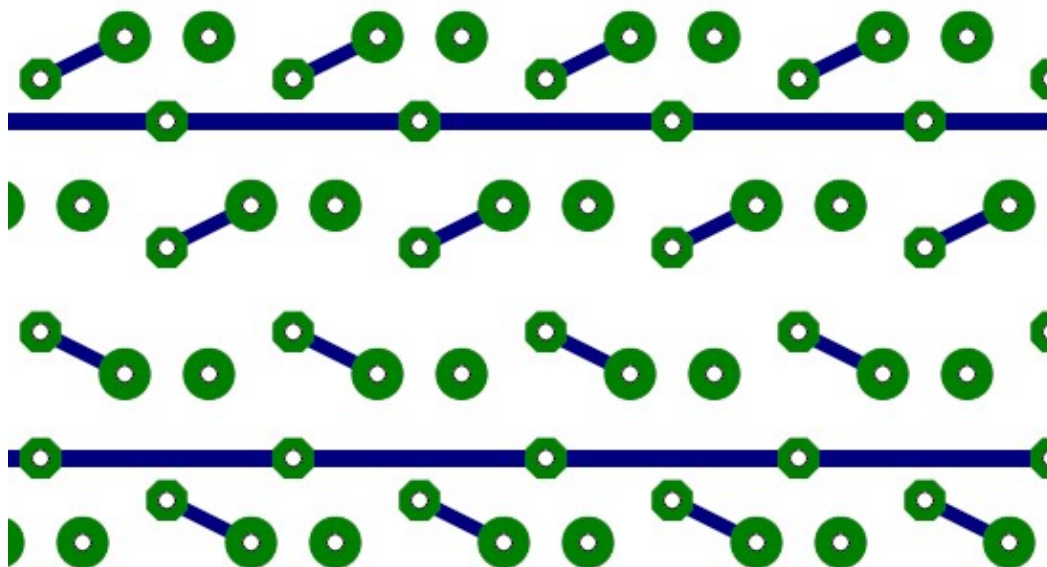


Figura 6-2. Fotolito para la experimentación con PCBs

Se buscó este patrón para la fotomáscara debido a la complejidad que albergaba. Los pads eran pequeños y las pistas esbeltas, lo que iba a exigir una gran precisión a la insoladora que se ha desarrollado para conseguir el PCB de este fotolito con la suficiente calidad. El tipo de material que se usaría para imprimir este patrón sería en papel translucido. Debido a que eran experimentos de prueba, no merecía la pena generar una máscara en plástico transparente.

Las insolaciones se iban a medir en pasadas de 20 segundos cada una, ya que se había configurado el temporizador para ello. Después de realizar dichas pasadas y el posterior revelado, iban a permanecer las zonas de resina que no se habían iluminado, ya que esta es del tipo positiva.

Para la realización de los primeros experimentos, se usó un PCB de $35\ \mu\text{m}$ el cual fue dividido en 3 obleas para que se usase el mismo material en cada insolación. El número de pasadas que se aplicaban a cada oblea iba incrementándose desde las 2 pasadas hasta las 10, lo que significaba que se iban a tener PCBs iluminados durante 40 s, 100 s, 160 s y 200 s. Los resultados son los obtenidos tras el revelado y se pueden ver en las siguientes imágenes.

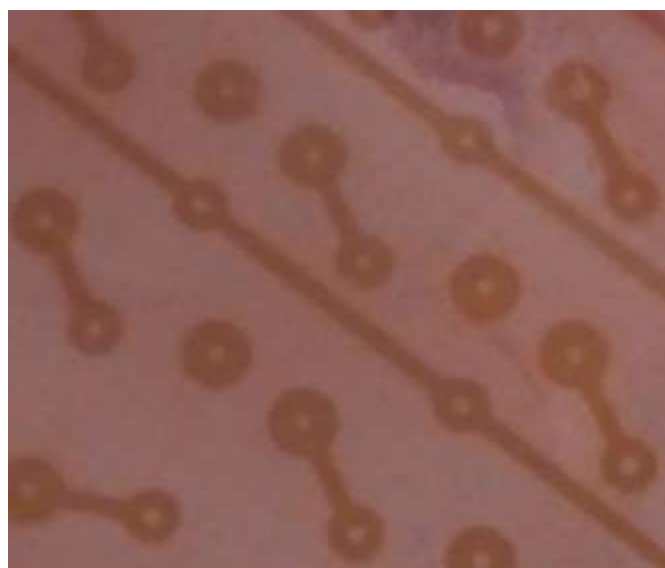


Figura 6-3. PCB 35 μm , 40 s

En esta primera insolación se puede ver como 2 pasadas son insuficientes puesto que después de revelar la placa sigue quedando resina antes de vislumbrar el cobre. Aparte, las pistas y pads no están muy bien definidos, lo que significa que se debe aumentar el de insolaciones.

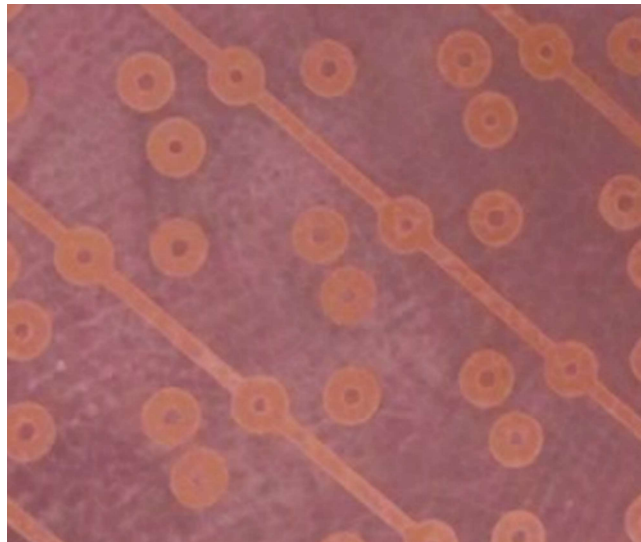


Figura 6-4. PCB 35 μ m, 100 s

Para este caso, se puede comprobar como el insolado es correcto. Los pads y pistas están bien definidos y el patrón es claro. Por lo que el tiempo que la insoladora iba a requerir para insolar este tipo de PCBs iba a ser alrededor de 1 *min* y 40 s, lo que es lo mismo que decir que serían 5 pasadas con el temporizador programado para que cada pasada durase 20 segundos.

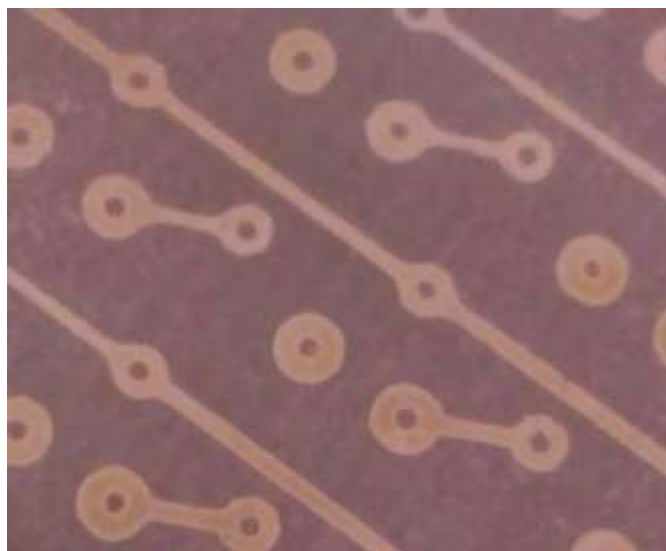


Figura 6-5. PCB 35 μ m, 160 s

Se aumentó el tiempo de insolado hasta los 160 s. Se puede ver como la calidad de lo obtenido es inferior que anteriormente. Esto es debido a que la superficie ha sido sobre expuesta a la radiación. Las zonas más finas han comenzado a perder espesor y las coronas circulares que forman los pads empiezan a presentar defectos.



Figura 6-6. PCB 35 μm , 200 s

Este tiempo es el equivalente a 10 ciclos de insolación. El resultado es bastante peor en relación con los anteriores. Algunas pistas han comenzado a borrarse. Esto es debido a que la radiación empieza a ser excesiva y debido a que el ancho de las figuras es muy reducido, las pistas comienzan a encogerse ya que se iluminan zonas más profundas de las mismas. La potencia lumínica recibida ha sido excesiva.

De este experimento el resultado obtenido es que el tiempo de insolación iba a rondar los 100 s, lo que es equivalente a 5 pasadas de insolado.

También es importante saber que si el tiempo de exposición es muy reducido ocurre lo de la figura 6-3 donde aún queda una fina capa de resina sobre el cobre después del revelado. El hecho contrario también es un caso que se debe evitar, excederse con el número de repeticiones hace que la calidad disminuya y se pierda precisión en el resultado.

A modo de comprobación se atacó la muestra de la figura 6-4 que era la que se consideraba correcta. Así se conseguía eliminar el sobrante de cobre y dejar completa la fabricación del PCB. El resultado se puede ver en la figura 6-7.

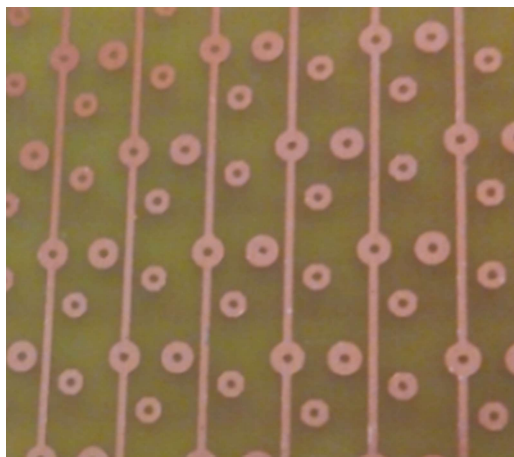


Figura 6-7. PCB después del atacado. 35 μm , 100 s

Se puede ver que la calidad obtenida es bastante elevada.

El siguiente experimento que se realizó fue con un PCB de un espesor de cobre de $70\ \mu\text{m}$. Se insoló esta vez 120 s y con otra máscara diferente, esta vez el fotolito era plástico transparente y no papel translucido. Un detalle del resultado obtenido tras el revelado se puede ver en la figura 6-8.



Figura 6-8. PCB $70\ \mu\text{m}$, 120 s.

Como se puede comprobar el resultado vuelve a ser positivo.

Una última prueba fue realizada con otro tipo de máscara con más complejidad pero con el mismo PCB que en el caso anterior. El resultado después del revelado y el atacado es el que aparece en la figura 6-9.

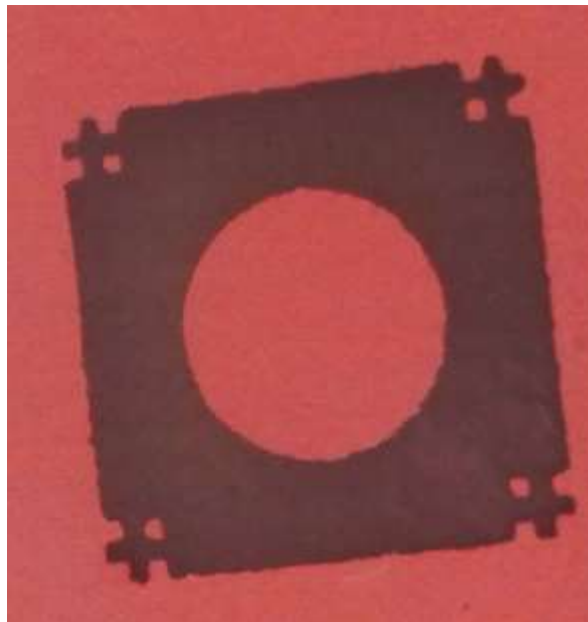


Figura 6-9. PCB $70\ \mu\text{m}$, 120 s.

Hay que indicar que el tamaño de las cruces laterales es de tan solo $1.2\ \text{mm}$ y que el círculo central tiene un diámetro de $5\ \text{mm}$. Se aprecia cómo están todos los detalles bien definidos inclusive el entorno de las pequeñas cruces, por lo que la insoladora que se ha desarrollado, tiene un gran potencial. El próximo paso es comprobar la funcionalidad en la fabricación de microestructuras.

6.2 Insolación de resina SU-8

En este apartado es donde se realizan los experimentos más importantes del proyecto. Una vez se ha fabricado la insoladora y testeado que es capaz de insolar PCBs con grandes resultados, queda comprobar si cumple con la función de fabricación de microestructuras de SU-8.

Para ello primero había que preparar las obleas correspondientes. Dichas obleas iban a ser PCBs pero revelados y atacados en su totalidad, es decir, que sólo quedaría el plástico que los compone (el cual es Flame retardant 4 –FR4) una vez hecho esto, se suavizaba los bordes de la placa con una lija para evitar un reborde de resina y que esa zona de la oblea quedase inutilizable.

Los pasos siguientes son los correspondientes al proceso de deposición y calentamiento de la resina SU-8. El tipo de resina que se usará serán del tipo SU-8 2005 y SU-8 2050, de este último se puede ver su etiqueta en la figura 6-10.

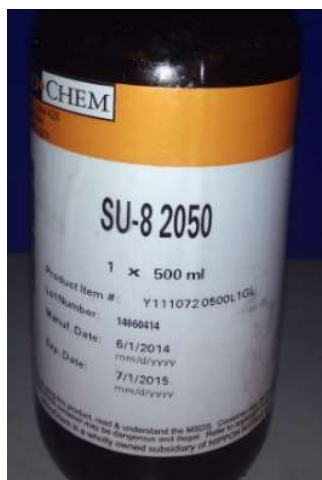


Figura 6-10. Resina SU-8 2050

La del tipo SU-8 2005 tenía una viscosidad inferior que la SU-8 2050 lo que hacía que el espesor de resina conseguido fuese de entorno décimas de micras, mientras que con la 2050 se obtenían espesores del orden de cientos de micras.

El tiempo de insolación iba a depender por tanto de la resina usada ya que mientras mayor espesor más tiempo requerirá.

La resina destinada a la fabricación de microestructuras no era depositada directamente sobre el plástico de la oblea, sino que previo a ello se conseguía una fina capa llamada capa semilla. Esta capa semilla tenía la función de mejorar la adherencia y estaba formada por SU-8 2005 por lo que el espesor era de alrededor de las 10 μm . El proceso de deposición de esta capa semilla era el siguiente:

- Deposición en el Spin Coater a una velocidad de giro de 1500 *rpm*.
- Calentamiento en el Hotplate de 2 *min* a 65°C y 2 *min* a 95°C
- Exposición de 40 s
- PEB de 2 *min* a 65°C y 2 *min* a 93°C. No hace falta revelar porque no se ha usado ninguna máscara y todo se ha polimerizado.

Después de esto, se pasaba a la deposición de la resina sobre la que se iba a trabajar. Se iban a seguir pasos similares que con la capa semilla pero variando los parámetros de los tiempos de horneado y la velocidad de giro del Spin Coater.

En el caso de SU-8 2005, los parámetros para obtener una capa de este tipo de resina eran los mismos que para la capa semilla, sólo que durante la exposición, se hubiese usado una fotomáscara para generar las formas requeridas y después haría falta su posterior revelador para eliminar la resina sobrante.

En cambio, para obtener capas de espesor de 300 μm se usaba SU-8 2050 lo cual requería que

- Deposición en el Spin Coater a una velocidad de giro de 700 *rpm* para generar una capa de 150 μm .
- Calentamiento en el Hotplate de 5 *min* a 65°C y 20 *min* a 95°C
- Enfriamiento durante 3 *min*
- Otra deposición a 700 *rpm* para crear otra capa de 150 μm sobre la anterior. El total es 300 μm .
- Calentamiento 5 *min* a 65°C y 45 *min* a 105°C
- Exposición
- PEB de 2 *min* a 65°C, 2 *min* a 95°C más 2 *min* a 120°C.
- Revelando durante 4 a 5 *min*.

Después de obtener las obleas con la resina SU-8, se procedió a insolarlas. El tiempo de iluminación que se ha usado es distinto para cada tipo de resina. Entre cada pasada de insolado, se hacía un tiempo de descanso de 10 *s* para que la resina no sufriese sobreestresamiento y provocase tensiones superficiales internas que harían que la microestructura se agrietase.

Tabla 6-1. Tiempos de insolado SU-8

Tipo de resina	Ciclos de insolado	Tiempo
SU-8 2005	10	200s
SU-8 2050	15	300s

Primero se insoló la resina SU-8 2005 con la misma máscara que se había usado anteriormente para el PCB que ha generado la figura 6-9. El ángulo de insolado impuesto fue $\beta = 0^\circ$ ya que al obtenerse una capa muy fina de resina, el ángulo en la microestructura iba a ser difícilmente apreciable. El resultado obtenido con los tiempos de horneado y los tiempos de insolado que ya se han comentado se puede apreciar en la figura 6-10.



Figura 6-10. Resina SU-8 2005. 10 ciclos de insolado

Se empieza a vislumbrar con nitidez que la insoladora es capaz de realizar la función principal para la que fue diseñada. Se ve ligeramente la forma que se ha deseado obtener. Esta se corresponde a la parte de la fotomáscara

que ha sido iluminada ya que la resina SU-8 es negativa. Para obtener una imagen más clara es necesaria realizarla con un microscopio, así se ven los detalles de la microestructura fabricada.

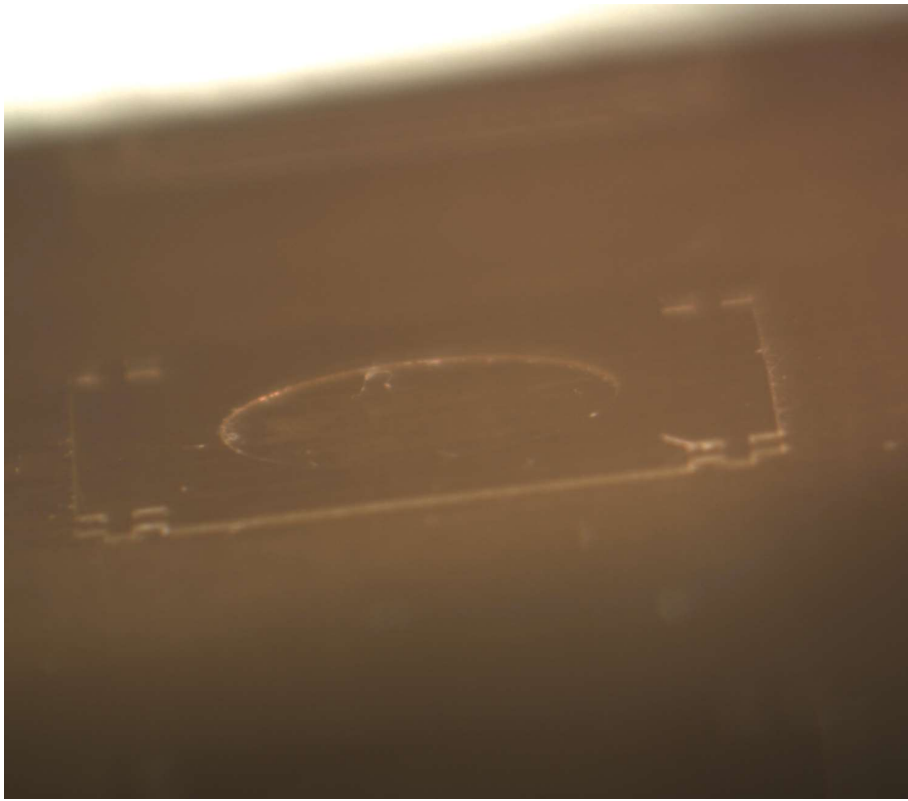


Figura 6-11. Resina SU-8 2005. 10 ciclos de insolado. Desde microscopio.

Se recuerda que la dimensión de la cruz con forma de “+” es de tan sólo 1 mm de longitud. Además, el diámetro del círculo es de 5 mm. Como se puede apreciar, la calidad de la estructura es bastante alta notándose que las formas están bien definidas.

Después de usar esta resina, se pasó a depositar SU-8 2050, ya que si la 2005 la había insolado correctamente, lo próximo era comprobar si era capaz de hacer lo mismo con una deposición de mayor espesor. Para comenzar, se generó una deposición de 300 μm en la que se iba a insolar de forma que el ángulo fuese nulo

Para verlo en más detalla es necesario usar más aumentos en el microscopio. En la figura 6-12 y 6-13 se tiene el resultado de centrar esos aumentos la forma más compleja de esta microestructura



Figura 6-12. Resina SU-8 2050. 15 ciclos de insolado. Desde microscopio

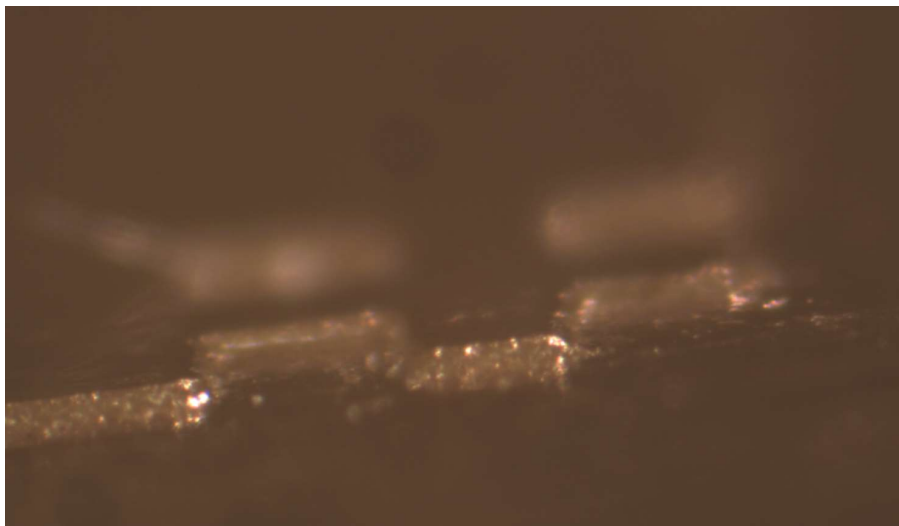


Figura 6-13. Resina SU-8 2050. 15 ciclos de insolado. Desde microscopio

Las imágenes 6-12 y 6-13 son una prueba de que la insoladora tiene una gran precisión ya que las paredes de las estructuras que insola cuando el ángulo de insolado es nulo están bastante bien definidas. Esto es sin duda a la buena colimación de los rayos procedentes de los LEDs, la cual es incrementada gracias al uso del coat.

Ahora quedaba la prueba definitiva. La insolación con inclinación. El próximo paso era obtener una determinada microestructura en resina a partir de la aplicación de radiación UV con la insoladora que se ha desarrollado en este proyecto. Era la forma de ver que el diseño había sido correcto y que se habían cumplido los objetivos más importantes que se habían marcado.

Para ello se procedió con una oblea donde se había depositado de nuevo SU-8 2050 de $300\ \mu\text{m}$ sobre la capa semilla. El espesor obtenido había sido de unas $300\ \mu\text{m}$ y la fotomáscara que se iba a usar iba a generar una estructura prismática con la base de una cruz “+” como la de las figuras anteriores, pero esta vez, debía estar inclinada un ángulo $90^\circ - \beta$.

Se escogió $\beta = 30^\circ$ ya que era el diseño de esta insoladora podía girar la placa de LEDs, por lo que la estructura generada será 60° . Después de las 15 pasadas de la insoladora y el posterior tratado se obtuvo la microestructura que se puede ver en la figura 6-15 y 6-16

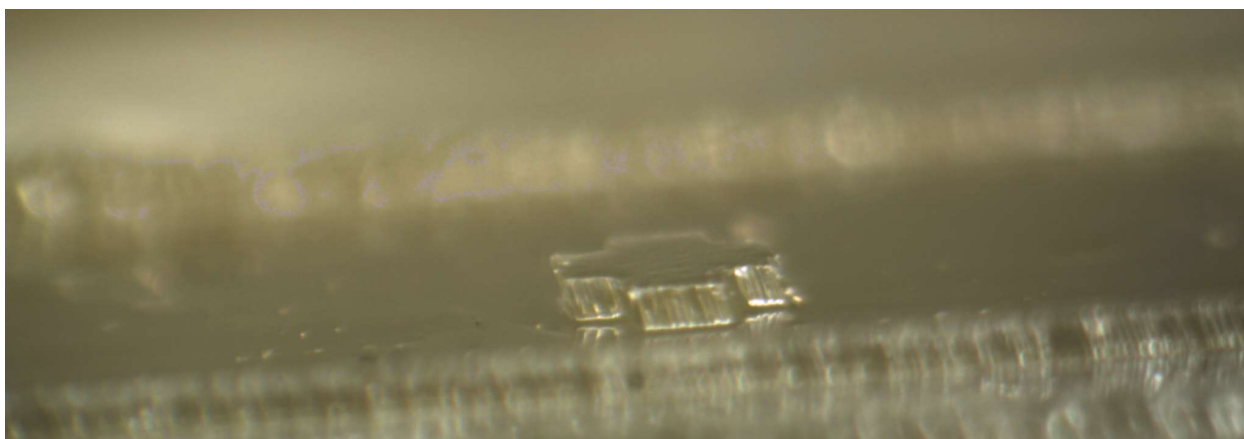


Figura 6-14. Resina SU-8 2050. 10 ciclos de insolado. $\beta = 30^\circ$

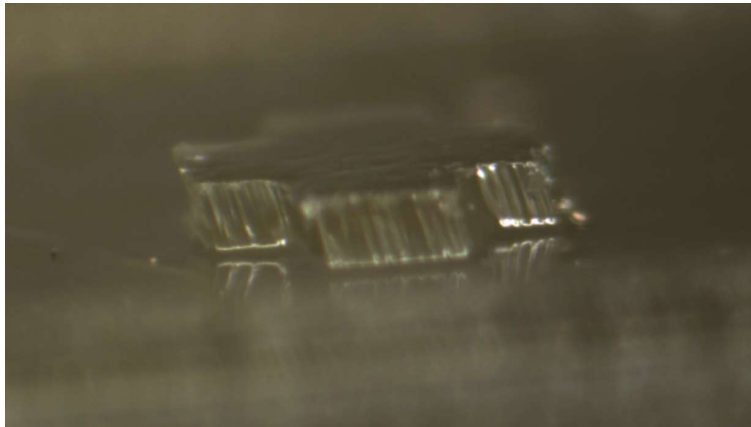


Figura 6-15. Resina SU-8 2050. 10 ciclos de insolado. $\beta = 30^\circ$

El resultado era inmejorable. Una estructura inclinada de un espesor de $300\ \mu\text{m}$ con las paredes laterales definidas y planas. Esto dejaba comprobado que se había conseguido la insolación con un ángulo dado, el cual era el objetivo más complejo de obtener de todo el proyecto y que validaba por completo el diseño escogido, tanto por la parte electrónica como por la parte mecánica que permitía imponer el ángulo β a la matriz de LEDs.

7 CONCLUSIONES Y MEJORAS FUTURAS

7.1 Conclusiones del proyecto

Las conclusiones obtenidas de este proyecto han sido abundantes, tanto durante el proceso de investigación, fabricación y diseño como con los resultados obtenidos.

Para empezar, es obligatorio comentar que se han cumplido todos y cada uno de los objetivos propuestos, los cuales abrían este documento apareciendo en el Capítulo 1, parte 2.

- ✓ **Objetivo Principal: Funcionalidad.** El Capítulo 6 es la evidencia de que la funcionalidad de la insoladora es la buscada. Tiene la capacidad de iluminar con radiación ultravioleta obleas para generar PCBs y microestructuras de resina, y además lo consigue con una alta precisión generando las formas con una gran resolución. Dicha precisión es digna de una alineadora óptica, por lo que puede considerarse que se ha cumplido con creces, el objetivo principal del diseño.
- ✓ **Insolación inclinada:** una ampliación del objetivo principal, dentro de los secundarios, se constituye como el más importante. La capacidad de fabricar microestructuras inclinadas es algo que se ha conseguido gracias a una combinación entre el diseño mecánico y el electrónico. Las buenas características de la matriz de luz generan una sombra uniforme y de gran potencia de radiación además de que los rayos procedentes de los LEDs tienen un alto índice de colimación gracias a su bajo ángulo de apertura y a la instalación del complejo coat fabricado a medida para la matriz de LEDs. El uso de un sistema mecánico de dos ruedas dentadas hace posible que sobre la placa se pueda aplicar cierto ángulo, consiguiendo que el haz de luz sea proyectado sobre la superficie a insolar de forma oblicua y así generar microestructuras inclinadas de gran resolución y detalle.
- ✓ **Bajo coste:** no hay más que ver el montante final del presupuesto de fabricación al que asciende el proyecto. Dicha cifra no alcanza los 100 € como se puede ver en el Anexo II el cual se hace un desglose de los componentes utilizados, así como de los materiales usados para la construcción de la insoladora. De esta cifra, la mitad corresponde tan sólo a los LEDs. Hay que destacar el detalle de que con el software de impresión 3D se consigue cuantificar el precio de los elementos que se han impreso para este proyecto se consigue cuantificar la cantidad de plástico que se ha fundido, el cual no supera el medio kilo de peso por lo en el presupuesto se ve que el coste es inferior a 10.
- ✓ **Eficiencia:** el uso de la electrónica de bajo consumo energético ha permitido cumplir este objetivo, siendo la potencia total de la insoladora de 16,5 W. Una cifra insignificante en comparación con la que consumen los otros tipos de fuentes ultravioletas descritas en la Introducción, obviando las linternas UV las cuales se separan un poco de las insoladoras y alineadoras.
- ✓ **Estética:** A la vista está de que la forma exterior que presenta este diseño dista mucho de la forma de una insoladora convencional. El uso de bobinas de plástico de colores vivos en la impresión 3D permite la fabricación en estos característicos colores. Gracias al diseño en 3D con el software Catia, se ha podido crear las formas a conveniencia para que se cumpliesen los requisitos necesarios del diseño a la vez que se cuidaba la estética del mismo. Además, se ha conseguido un diseño compacto haciendo esta máquina muy versátil.

Gracias al cumplimiento de los objetivos marcados, se ha conseguido una máquina útil, versátil y potente a la par que sencilla, económica y eficiente. Esta insoladora permitirá insolar obleas cuadradas de unos 74 mm de lado en el caso de que el ángulo configurado sea nulo. Si aumenta, se puede llegar a insolar rectángulos de 74 mm x 86 mm lo que es un tamaño más que suficiente para la microfabricación.

El reducido tamaño de los productos está en relación con el reducido tamaño de la máquina que los produce. El diseño compacto de la insoladora la dota de una gran versatilidad y simpleza, lo que hace más fácil su uso y

mantenimiento. Con sólo retirar los dos tornillos que fijan la tapa a la base se consigue acceder a los LEDs, lo que puede ser necesario a la hora de cambiar alguna unidad. Pero esto será en contadas ocasiones ya que una de las características de estos tipos de lámparas ultravioletas es su vida útil, rondando las 2000 horas de funcionamiento. Si se divide en insolaciones de 20 segundos, no haría falta cambiar los LEDs hasta haber repetido muchos ciclos de insolado.

Otra cosa importante a comentar es la elección de la impresora 3D ha sido un completo acierto. Haber usado esta tecnología para la fabricación de estas piezas ha supuesto una reducción del precio del proyecto ya que se ha evitado tener que adquirirlas por separado. Además, ha permitido disponer de la forma necesaria de cada pieza por separado para que encajase perfectamente con el resto. Este es un tema al que se le puede sacar bastante partido, sobre todo a la hora de desarrollar proyectos como este donde se premia el diseño y la funcionalidad. En vez de tener que fabricar las piezas de forma rudimentaria o comprándolas, tan sólo hay que dibujarlas mediante el software correspondiente y dejar que la impresora 3D haga su trabajo el tiempo que sea necesario.

Como se tomó la alineadora del laboratorio como referencia para calcular la potencia de insolación de la placa de LEDs, se puede hacer una breve comparación entre la insoladora y esta alineadora.

Comenzando por el volumen, la alineadora ocupa un espacio aproximado de $1.5m \times 1.5m \times 0.6m$, el volumen de la insoladora desarrollada es de $18cm \times 16,6cm \times 15,5cm$ lo que deja en evidencia que ambas máquinas puedan realizar la misma función. Para ser honestos, el tamaño de la huella de insolación de la alineadora es un círculo de $30cm$ de diámetro el cual es mayor que la huella de la insoladora, que tiene unas dimensiones máximas de un cuadrado de $74mm \times 86mm$ como se ha comentado anteriormente. Las medidas de volumen de la máquina frente a superficie de fabricación no son proporcionales ya que la insoladora es mucho más compacta.

En cuanto a la potencia eléctrica consumida, se ha descrito que la cifra de la insoladora es de $16.5W$. Si se compara con la alineadora, se comprueba que este es otro punto a favor con respecto a esta, ya que la alineadora utiliza lámparas de mercurio de $1000W$ aproximadamente.

La sencillez que tiene esta insoladora es incomparable con la complejidad de la alineadora, la cual necesita 15 minutos entre el encendido y la primera insolación. Cuando es apagada, necesita otros 15 minutos para que se pueda volver a encender.

Finalmente, un aspecto importante: el precio. La alineadora vale un total de $55.000€$, frente a los $100€$ del coste de fabricación de la insoladora. Las cifras hablan por sí solas. Los presupuestos son incomparables aunque el presupuesto del Anexo II no refleja los costes de mano de obra de diseño y fabricación, pero por seguro, que aun incluyéndolos, serían incomparables.

La ventaja principal de la alineadora es que incorpora funciones que la insoladora no. La más importante de estas funciones es la capacidad de alineación de estructuras, esta función es la que le da el nombre a las insoladoras y es la que permite crear microestructuras con una mayor complejidad. La insoladora que se ha fabricado no incorpora esta tecnología pero podría ser una posible mejora futura. Se comentará en el siguiente punto.

La sencillez del uso de la insoladora está bastante alta. A modo de manual de usuario, se podría comentar los pasos a seguir para usarla.

- 1º Levantar la tapa y situar el fotolito de forma correcta según el ángulo con el que se vaya a insolar. Para ello se incorporan unas marcas que hacen referencia de la posición de la huella con dicho ángulo.
- 2º Seleccionar el ángulo de insolación deseado a través de girar el engranaje pequeño.
- 3º Presionar el pulsador situado en la parte superior para comenzar la insolación. El ciclo de insolación se compone de 20 segundos de iluminación y 10 segundos de descanso. Pasado este tiempo, volver a presionar el pulsador de nuevo.

No hace falta mucho más para el uso de este aparato.

En resumen, el valor de esta insoladora recae en el diseño que tiene, el cual la hace una opción ventajosa frente a otros aparatos de insolación. Además el incorporar la funcionalidad de la insolación con ángulo le da una mayor ventaja frente a las demás máquinas.

7.2 Mejoras futuras

En este punto se comentará brevemente algunas posibles mejoras futuras de la insoladora.

- Reprogramación del microcontrolador para que controle de forma más precisa los ciclos de insolado. El programa que lleva cargado tal micro, viene configurado para que este haga funcionar el driver durante 20 segundos. Se podría configurar de forma que se pueda seleccionar el número de ciclos de insolación a realizar y que una vez comenzados, fuese el propio microcontrolador el que los realizase de forma automática. Esto incrementaría la dificultad del programa de control además de que haría falta una entrada para seleccionar la cantidad de ciclos que se quiere realizar. Se podría incluir la posibilidad de programar el micro desde fuera, es decir, desde un ordenador. Si se hiciese esto habría que incluir la electrónica necesaria y un puerto de programación. Un cambio sencillo sería modificar el tiempo de insolación, pero eso ya depende de las necesidades que se deban tener en cuenta, en este caso se han ajustado a la fabricación de microestructuras de resina SU-8.
- Instalación de un ventilador de refrigeración. Si se aumentase demasiado los tiempos en los que los circuitos electrónicos estuvieran funcionando, tal vez se podría producir un sobrecalentamiento de los mismos porque podría llegar el caso en el que el calor aumentaría hasta que el disipador instalado no fuese suficiente. Por ello, se podría instalar un ventilador próximo la aleta del regulador para que lo refrigerase ya que es el punto más crítico al ser el que más potencia genera. Esto se tuvo en cuenta a la hora de diseñar la caja, donde en la base de la misma se configuró un espacio para el acoplamiento de un ventilador de refrigeración. Esa base era necesaria para aportar rigidez a la insoladora, pero que se hiciese teniendo esta idea en cuenta le dio un valor añadido al diseño.
- Instalar motores para controlar cambiar el control manual por un sistema automático. Se podría cambiar los engranajes por un motor paso a paso que variase el ángulo de insolación de forma automática, además, se podría incorporar el movimiento en un segundo eje si se instalase otro motor y un sistema de actuadores. Para ello se podría reprogramar el microcontrolador para usarlo como unidad de control de los motores.
- Configurar giro de la superficie de insolación. Otra modificación posible sería hacer girar la superficie que se insola respecto de la placa de LEDs, con ello se podría llegar a conseguir microestructuras giradas que podrían dar lugar a multitud de formas si se combina con la opción de generar microestructuras inclinadas.
- Sustituir la superficie de policarbonato por un cristal. Esto hace más fácil el mantenimiento de la insoladora ya que sería más sencillo de limpiar esta superficie. Es más sencillo eliminar restos de resina del vidrio que del policarbonato ya que la acetona deteriora el policarbonato pero no el vidrio.
- Incluir un sistema de alineación. Si se incluyese dicho sistema se estaría un paso más cerca de llegar a las mismas características que las alineadoras. Podría ser complejo pero posible en un futuro.

REFERENCIAS

- [1] Jungkwun ‘JK’ Kim*, Seung-Joon Paik, Florian Herrault, Mark G. Allen
School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta,
GA, USA. *UV-LED LITHOGRAPHY FOR 3-D HIGH ASPECT RATIO MICROSTRUCTURE
PATTERNING*
- [2] Jungkwun Kim, Yong-Kyu Yoon and Mark G Allen, Published 27 January 2016 • © 2016 IOP
Publishing Ltd. *Computer numerical control (CNC) lithography: light-motion synchronized UV-
LED lithography for 3D microfabrication*
- [3] Lorenz, H., Despont, M., Fahrni, N., LaBianca, N., Renaud, P., & Vettiger, P. (1997). *SU-8:
a low-cost negative resist for MEMS*. Journal of Micromechanics and Microengineering, 7(3),
121.
- [4] Lorenz, H., Despont, M., Fahrni, N., Brugger, J., Vettiger, P., & Renaud, P. (1998). *High-
aspect-ratio, ultrathick, negative-tone near-UV photoresist and its applications for MEMS*.
Sensors and Actuators A: Physical, 64(1), 33-39.
- [5] <https://es.wikipedia.org/>
- [6] [http://ocw.uma.es/ingenierias/electronica-de-potencia/ejercicios-proyectos-y-casos-
1/calculo_de_disipadores.pdf](http://ocw.uma.es/ingenierias/electronica-de-potencia/ejercicios-proyectos-y-casos-1/calculo_de_disipadores.pdf)
- [7] <http://myslide.es/documents/resina-su-8.html>

ANEXO I: DATASHEET DE LOS ELEMENTOS

➤ DATASHEET LED VAOL-5EUV8T4



UV LED LAMP

VAOL-5EUV8T4

Feature

- Low Power Consumption
- I.C. compatible

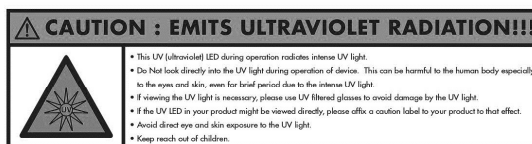
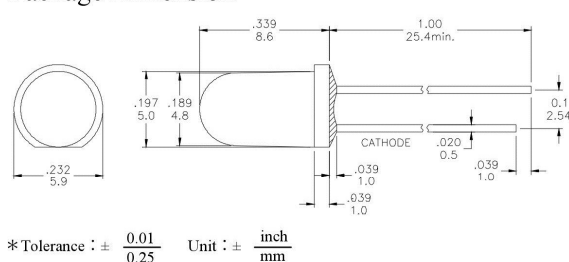
Applications

- Disinfection and Sterilization
- Adhesive Curing
- Leak Detection
- Authentication

Description

- These LEDs are Based on InGaN Material Technology
- Emitted color: Purple (UV)
- Water Transparent Lens

Package Dimension



Absolute Maximum Ratings at Ta=25°C

Symbol	Parameter	Max.	Unit
PD	Power Dissipation	120	mW
VR	Reverse Voltage	5	V
IAF	Average Forward Current	30	mA
IPF	Peak Forward Current (Duty = 0.1, 1kHz)	100	mA
—	Derating Linear Form 25°C	0.4	mA/°C
Topr	Operating Temperature Range	-20 to + 80	°C
Tstg	Storage Temperature Range	-20 to + 100	°C
Lead Soldering Temperature [1.6mm (0.063inch) From Body] 260°C For 5 Seconds.			

Electrical / Optical Characteristics and Curves at Ta=25°C

Symbol	Parameter	Test Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
VF	Forward Voltage	IF= 20 mA	2.8	3.0	3.6	V
IR	Reverse Current	VR= 5 V			50	μA
$\Delta \theta$	Half Intensity Angle	IF= 20 mA	--	15	--	Deg.
IV	Luminous Intensity	IF= 20 mA	--	100	--	mcd.
λ_p	Peak Wavelength	IF= 20 mA	380	385	--	nm

www.vcc-lite.com

199 bosstick blvd, ste 101
san marcos, ca 92069
phone 760.560.1300
fax 760.560.1301

RoHS

ISO 9001
Registered

Electrical Characteristics at Ta=25°C

Symbol	I _v		V _F		λ _p	
Parameter	Luminous Intensity		Forward Voltage		Peak Wavelength	
Condition	IF=20mA		IF=20mA		IF=20mA	
Unit	mcd		V		nm	
Binning	Grade	Range	Grade	Range	Grade	Range
	BIN8	65~90	P0	2.8~3.0	U2	380~385
	BIN 9	90~125	P1	3.0~3.2	U3	385~390
			P2	3.2~3.4		
			P3	3.4~3.6		

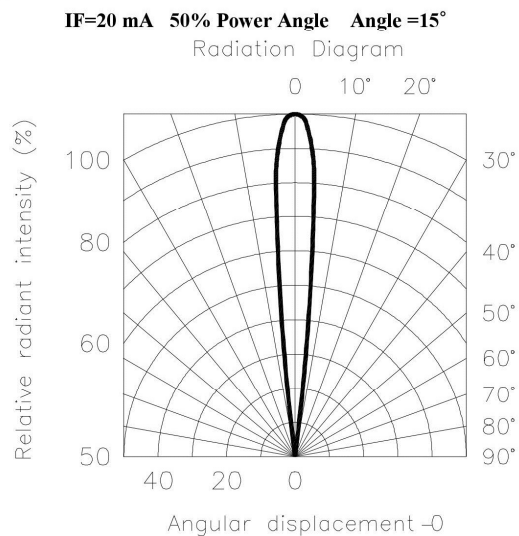
Intensity: Tolerance of minimum and maximum = ± 15%

V_F: Tolerance of minimum and maximum = ± 0.05V

NOTE:

1. Static electricity and surge damages the LED. It is recommend to use a anti-static wrist band or anti-electrostatic glove when handling the LEDs. All devices, equipment and machinery must be properly grounded.

Radiation Diagram

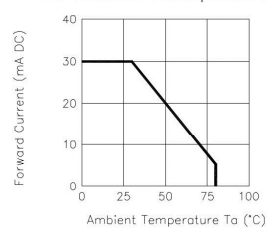




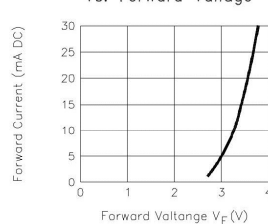
UV

Typical Electro-optical Characteristic Curves
(25°C Free Air Temperature Unless Otherwise Specified)

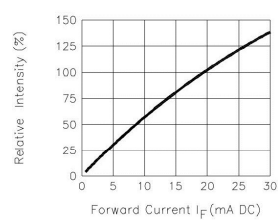
Forward Current
Vs. Ambient Temperature



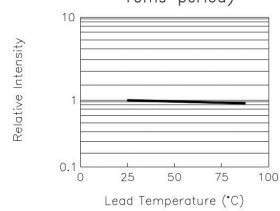
Forward Current
Vs. Forward Voltage



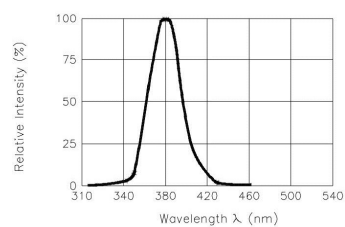
Relative Intensity
Vs. Forward Current



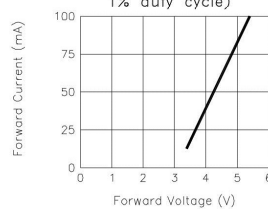
Relative Intensity
Vs. Lead Temperature
(Pulsed 20 mA; 300us pulse,
10ms period)



Relative Intensity Vs. Wavelength



Peak Forward Voltage
Vs. Forward Current
(100us test pulse,
1% duty cycle)



www.vcclite.com

199 bosstick blvd, ste 101
san marcos, ca 92069
phone 760.560.1300
fax 760.560.1301



➤ DATASHEET REGULADOR

Product
FolderSample &
BuyTechnical
DocumentsTools &
SoftwareSupport &
Community

LM1084

SNVS037G – SEPTEMBER 1999 – REVISED JANUARY 2015

LM1084 5-A Low Dropout Positive Regulators**1 Features**

- Available in 3.3-V, 5.0-V, and Adjustable Versions
- Current Limiting and Thermal Protection
- Output Current 5 A
- Industrial Temperature Range –40°C to 125°C
- Line Regulation 0.015% (Typical)
- Load Regulation 0.1% (Typical)

2 Applications

- Post Regulator for Switching DC-DC Converter
- High-Efficiency Linear Regulators
- Battery Chargers

3 Description

The LM1084 is a regulator with a maximum dropout of 1.5 V at 5 A of load current. The device has the same pinout as TI's industry standard LM317.

Two resistors are required to set the output voltage of the adjustable output voltage version of the LM1084. Fixed output voltage versions integrate the adjust resistors.

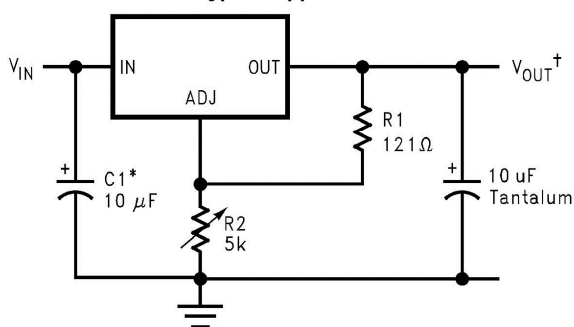
The LM1084 circuit includes a zener trimmed bandgap reference, current limiting, and thermal shutdown.

Refer to LM1085 for the 3A version, and the LM1086 for the 1.5A version.

Device Information⁽¹⁾

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
LM1084	TO-263 (3)	10.18 mm × 8.41 mm
	TO-220 (3)	14.986 mm × 10.16 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the datasheet.

Typical Application

*NEEDED IF DEVICE IS FAR FROM FILTER CAPACITORS

$$^{\dagger}V_{OUT} = 1.25V \left(1 + \frac{R2}{R1}\right)$$



An IMPORTANT NOTICE at the end of this data sheet addresses availability, warranty, changes, use in safety-critical applications, intellectual property matters and other important disclaimers. PRODUCTION DATA.

**LM1084**

SNVS037G – SEPTEMBER 1999 – REVISED JANUARY 2015

www.ti.com

6 Specifications**6.1 Absolute Maximum Ratings**over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)^{(1) (2)}

	MIN	MAX	UNIT
Maximum Input to Output Voltage Differential			
LM1084-ADJ		29	V
LM1084-3.3		27	V
LM1084-5.0		25	V
Power Dissipation ⁽³⁾		Internally Limited	
Junction Temperature (T _J) ⁽⁴⁾		150	°C
Lead Temperature		260, to 10 sec	°C
Storage temperature, T _{stg}	–65	150	°C

- (1) Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. *Recommended Operating Conditions* indicate conditions for which the device is intended to be functional, but specific performance is not ensured. For ensured specifications and the test conditions, see the *Electrical Characteristics*.
- (2) If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the Texas Instruments Sales Office/Distributors for availability and specifications.
- (3) Power dissipation is kept in a safe range by current limiting circuitry. Refer to *Overload Recovery*.
- (4) The maximum power dissipation is a function of T_{J(max)}, θ_{JA}, and T_A. The maximum allowable power dissipation at any ambient temperature is P_D = (T_{J(max)} – T_A) / θ_{JA}. All numbers apply for packages soldered directly into a PC board. Refer to *Thermal Considerations*.

6.2 ESD Ratings

	VALUE	UNIT
V _(ESD) Electrostatic discharge Human-body model (HBM), per ANSI/ESDA/JEDEC JS-001 ⁽¹⁾	±2000	V

- (1) JEDEC document JEP155 states that 500-V HBM allows safe manufacturing with a standard ESD control process.

6.3 Recommended Operating Conditionsover operating free-air temperature range (unless otherwise noted)⁽¹⁾

	MIN	MAX	UNIT
Junction Temperature Range (T _J) ⁽²⁾			
Control Section	–40	125	°C
Output Section	–40	150	°C

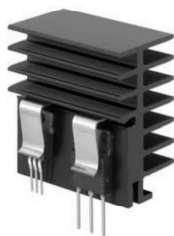
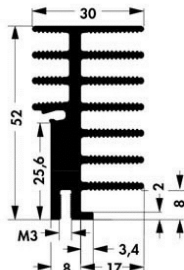
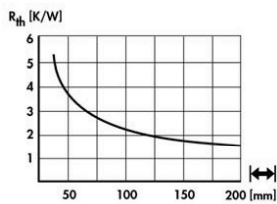


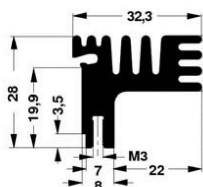
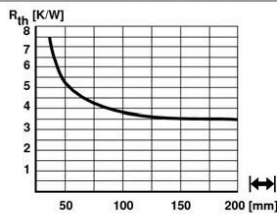


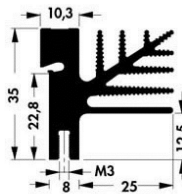
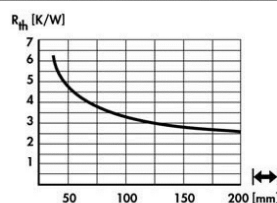

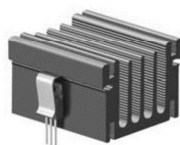
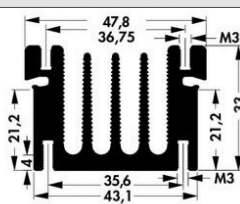
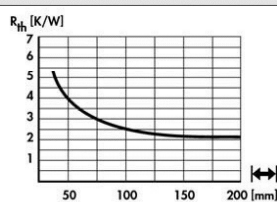

- (1) Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. *Recommended Operating Conditions* indicate conditions for which the device is intended to be functional, but specific performance is not ensured. For ensured specifications and the test conditions, see the *Electrical Characteristics*.
- (2) The maximum power dissipation is a function of T_{J(max)}, θ_{JA}, and T_A. The maximum allowable power dissipation at any ambient temperature is P_D = (T_{J(max)} – T_A) / θ_{JA}. All numbers apply for packages soldered directly into a PC board. Refer to *Thermal Considerations*.

6.4 Thermal Information

THERMAL METRIC ⁽¹⁾		LM1084		UNIT
		KT	NDE	
		3 PINS	3 PINS	
R _{θJA}	Junction-to-ambient thermal resistance	40.4	22.7	°C/W
R _{θJC(top)}	Junction-to-case (top) thermal resistance	42.6	15.5	
R _{θJB}	Junction-to-board thermal resistance	23.0	4.1	
ψ _{JT}	Junction-to-top characterization parameter	9.8	2.1	
ψ _{JB}	Junction-to-board characterization parameter	22.0	4.1	
R _{θJC(bot)}	Junction-to-case (bottom) thermal resistance: Control Section/Output Section	0.65/2.7	0.65/2.7	

- (1) For more information about traditional and new thermal metrics, see the *IC Package Thermal Metrics* application report, SPRA953.

➤ DATASHEET DISIPADOR

A	fischer elektronik				
Extruded heatsinks for lock-in retaining spring					
B	art. no.				
C	SK 514 ...				
D	please indicate: ...  25 37.5 50 75 100 1000 mm				
E	art. no.				
F	SK 574 ...				
G	please indicate: ...  25 37.5 50 75 84 100 1000 mm				
H	art. no.				
I	SK 482 ...				
K	please indicate: ...  25 37.5 50 75 84 100 1000 mm				
L	art. no.				
M	SK 495 ...				
N	please indicate: ...  25 37.5 50 75 100 1000 mm				
please note: profile threads → A 4					
<div><div>A 87</div><div><div>Mounting material for semiconduct.</div><div>Insulator caps</div><div>Mounting pads</div><div>Lock-in transistor fixing spring</div></div><div><div>→ E 37 – 41</div><div>→ E 43</div><div>→ E 39</div><div>→ A 117</div></div><div><div>Heatsinks for PCB</div><div>Profiles for PCB components</div><div>Heatsinks with threaded rail</div><div>Mounting parts for heatsinks</div></div><div><div>→ A 89</div><div>→ A 91</div><div>→ A 92</div><div>→ E 42 – 43</div></div></div>					

➤ DATASHEET MICROCONTROLADOR



MSP430G2x52
MSP430G2x12

www.ti.com

SLAS722B – DECEMBER 2010 – REVISED MARCH 2011

MIXED SIGNAL MICROCONTROLLER

FEATURES

- Low Supply Voltage Range: 1.8 V to 3.6 V
- Ultra-Low Power Consumption
 - Active Mode: 220 μ A at 1 MHz, 2.2 V
 - Standby Mode: 0.5 μ A
 - Off Mode (RAM Retention): 0.1 μ A
- Five Power-Saving Modes
- Ultra-Fast Wake-Up From Standby Mode in Less Than 1 μ s
- 16-Bit RISC Architecture, 62.5-ns Instruction Cycle Time
- Basic Clock Module Configurations
 - Internal Frequencies up to 16 MHz With Four Calibrated Frequencies
 - Internal Very-Low-Power Low-Frequency (LF) Oscillator
 - 32-kHz Crystal
 - External Digital Clock Source
- One 16-Bit Timer_A With Three Capture/Compare Registers
- Up to 16 Touch-Sense Enabled I/O Pins
- Universal Serial Interface (USI) Supporting SPI and I2C
- 10-Bit 200-kSPS Analog-to-Digital (A/D) Converter With Internal Reference, Sample-and-Hold, and Autoscan (MSP430G2x52 Only)
- On-Chip Comparator for Analog
- Brownout Detector
- Serial Onboard Programming, No External Programming Voltage Needed, Programmable Code Protection by Security Fuse
- On-Chip Emulation Logic With Spy-Bi-Wire Interface
- Family Members are Summarized in Table 1
- Package Options
 - TSSOP: 14 Pin, 20 Pin
 - PDIP: 20 Pin
 - QFN: 16 Pin
- For Complete Module Descriptions, See the *MSP430x2xx Family User's Guide (SLAU144)*

DESCRIPTION

The Texas Instruments MSP430™ family of ultra-low-power microcontrollers consist of several devices featuring different sets of peripherals targeted for various applications. The architecture, combined with five low-power modes, is optimized to achieve extended battery life in portable measurement applications. The device features a powerful 16-bit RISC CPU, 16-bit registers, and constant generators that contribute to maximum code efficiency. The digitally controlled oscillator (DCO) allows wake-up from low-power modes to active mode in less than 1 μ s.

The MSP430G2x52 and MSP430G2x12 series of microcontrollers are ultra-low-power mixed signal microcontrollers with built-in 16-bit timers, and up to 16 I/O touch sense enabled pins and built-in communication capability using the universal serial communication interface and have a versatile analog comparator. The MSP430G2x52 series have a 10-bit A/D converter. For configuration details see Table 1. Typical applications include low-cost sensor systems that capture analog signals, convert them to digital values, and then process the data for display or for transmission to a host system.



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of the Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

Copyright © 2010–2011, Texas Instruments Incorporated

➤ DATASHEET DRIVER



ULN2064B, ULN2066B ULN2068B, ULN2074B

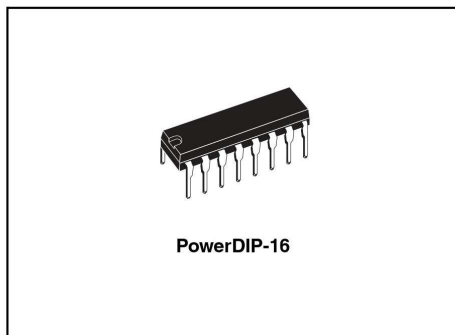
50 V - 1.5 A quad Darlington switches

Features

- Output current to 1.5 A for each Darlington
- Minimum breakdown 50 V
- Sustaining voltage at least 35 V
- Integral suppression diodes (ULN2064B, ULN2066B and ULN2068B)
- Isolated Darlington pinout (ULN2074B)
- Versions compatible with all popular logic families

Description

Designed to interface logic to a wide variety of high current, high voltage loads, these devices each contain four NPN Darlington switches delivering up to 1.5 A with a specified minimum breakdown of 50 V and a sustaining voltage of 35 V measured at 100 mA. The ULN2064B, ULN2066B and ULN2068B contain integral suppression diodes for inductive loads have common emitters. The ULN2074B feature isolated Darlington pinouts and is intended for



applications such as emitter follower configurations. Inputs of the ULN2064B, ULN2068B and ULN2074B are compatible with popular 5 V logic families and the ULN2066B are compatible with 6 - 15 V CMOS and PMOS. Type ULN2068B includes a pre-driver stage to reduce loading on the control logic.

Table 1. Device summary

Part numbers	Package
ULN2064B	PowerDIP-16
ULN2066B	PowerDIP-16
ULN2068B	PowerDIP-16
ULN2074B	PowerDIP-16

7 Typical applications

Figure 18. Common-anode LED drivers

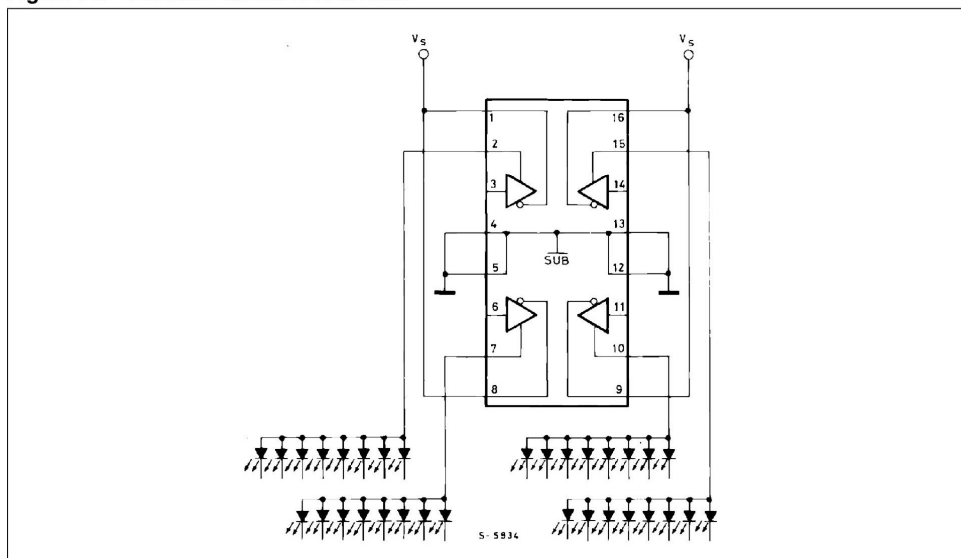
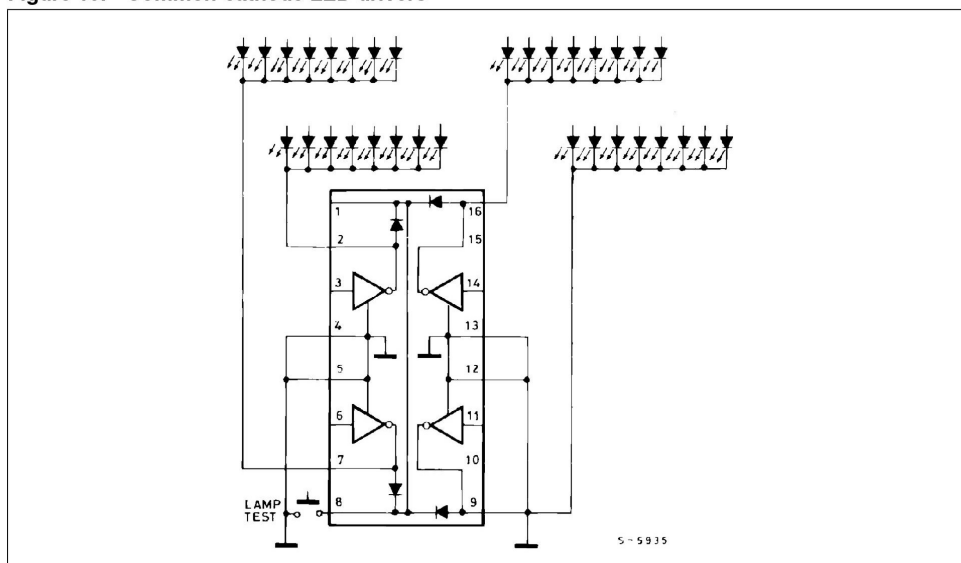


Figure 19. Common-cathode LED drivers



ANEXO II: PRESUPUESTO

Elementos Electrónicos

	<i>Cantidad (unidades)</i>	<i>Precio unitario (€)</i>	<i>IVA 21%</i>	<i>Total</i>
LED UV	100	0,474	0,57354	57,354
Regulador	2	2,59	3,1339	6,2678
Disipador	1	2,34	2,8314	2,8314
Quad Darlington	1	2,34	2,8314	2,8314
Microcontrolador	1	1,84	2,2264	2,2264
Pulsador	1	1,94	2,3474	2,3474
Total Electrónica				73,8584 €

Estructura y elementos mecánicos

	<i>Cantidad (kg)</i>	<i>Precio bobina 1kg</i>	
Caja	0,351	19,90	6,9849
Tapadera	0,066	19,90	1,3134
Engranajes	0,033	19,90	0,6567
Coat	0,013	19,90	0,2587
Total Estructura			9,4117 €

Otros

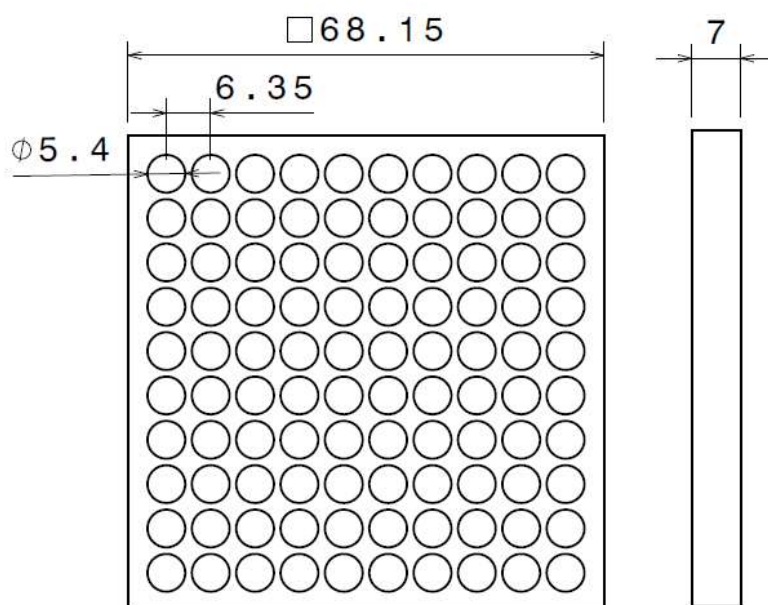
Tornillos, conectores, tuercas, arandelas, cables, PCB placas, placa de policarbonato, estaño de soldaduras	15 €
---	------

TOTAL

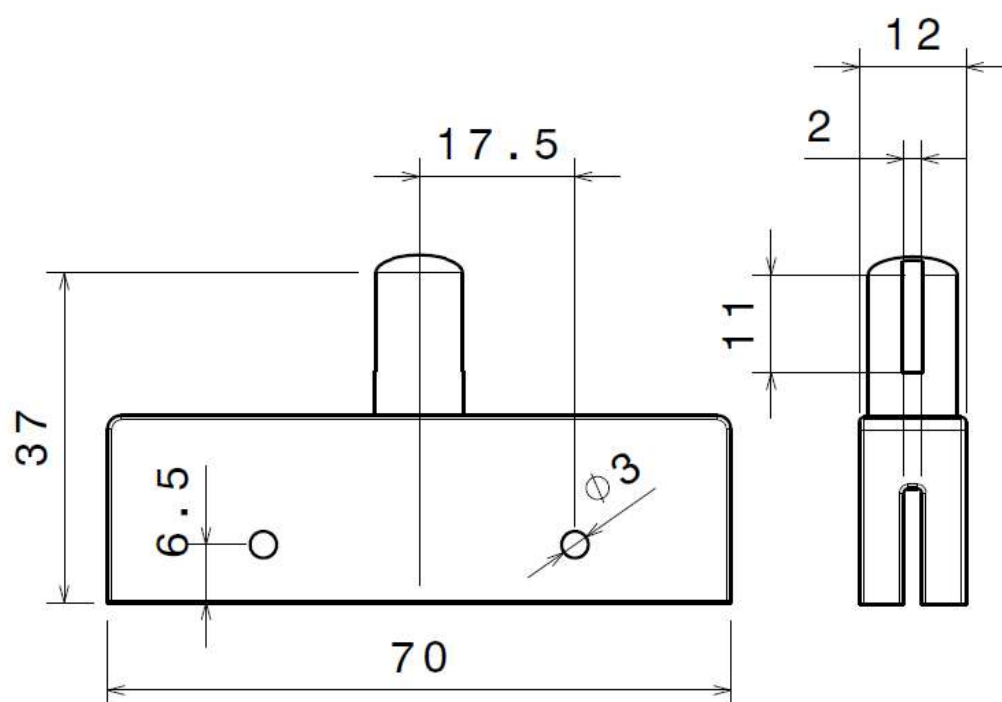
98,27 €

ANEXO III: PLANOS DE PARTES IMPRESAS

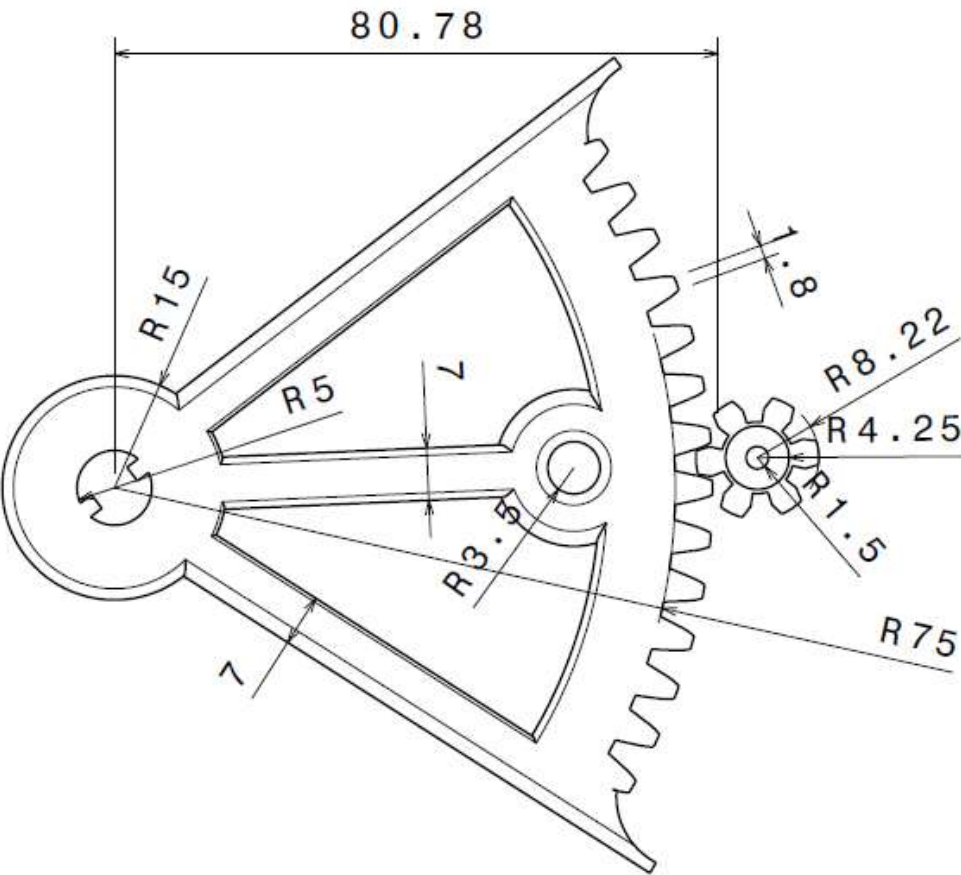
- Coat de los LEDs



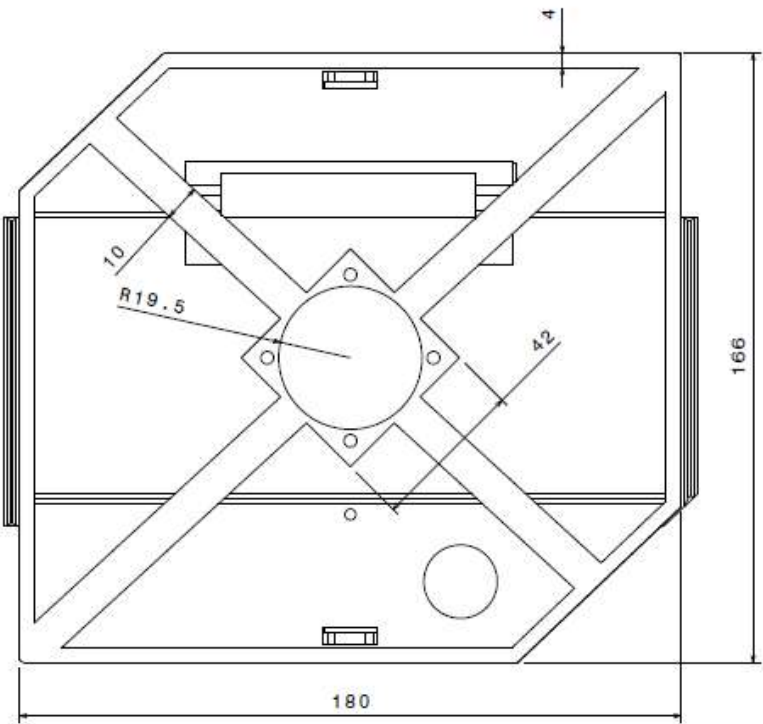
- Mordida de la placa

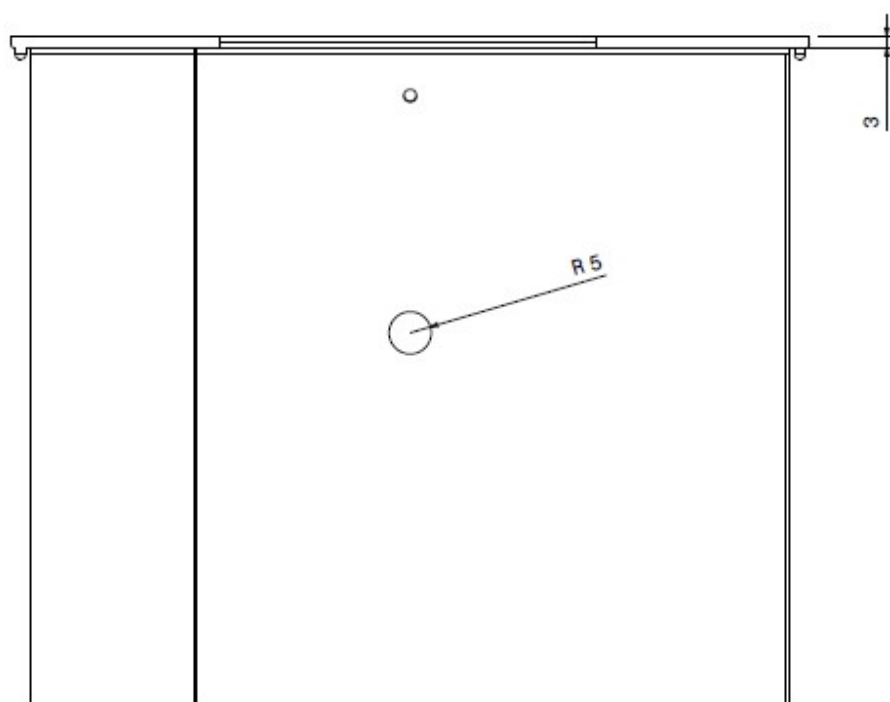
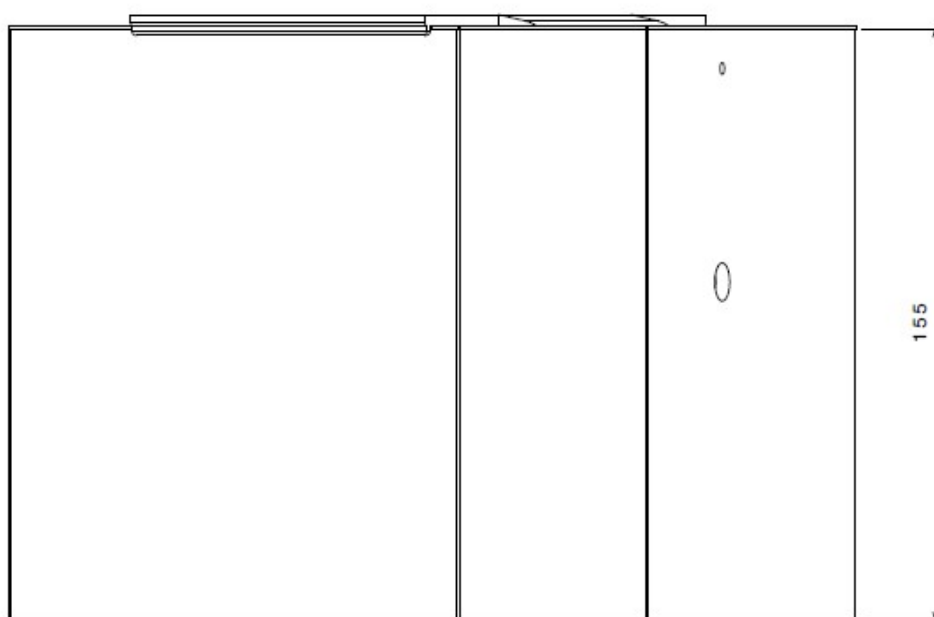


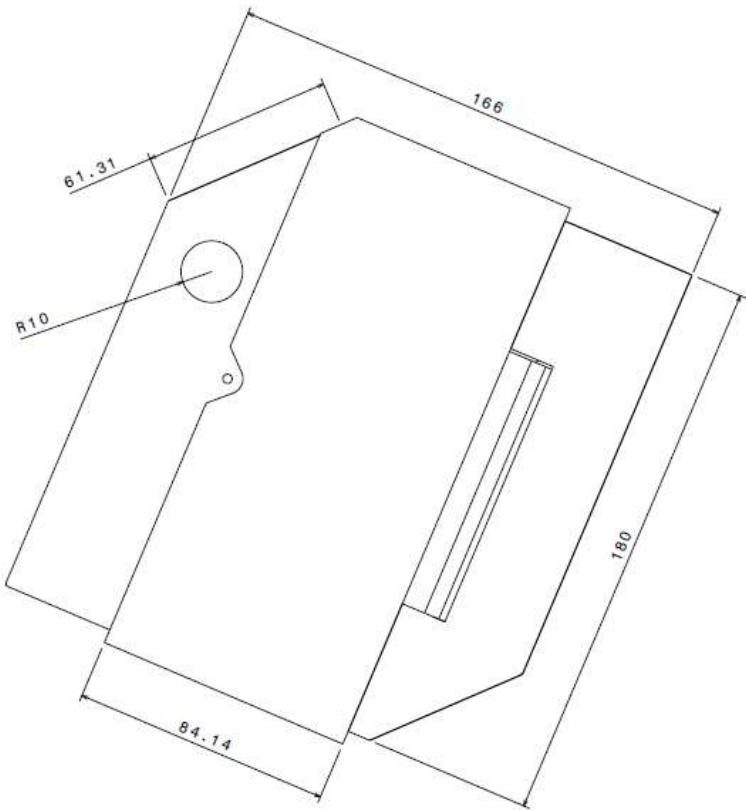
- Engranajes



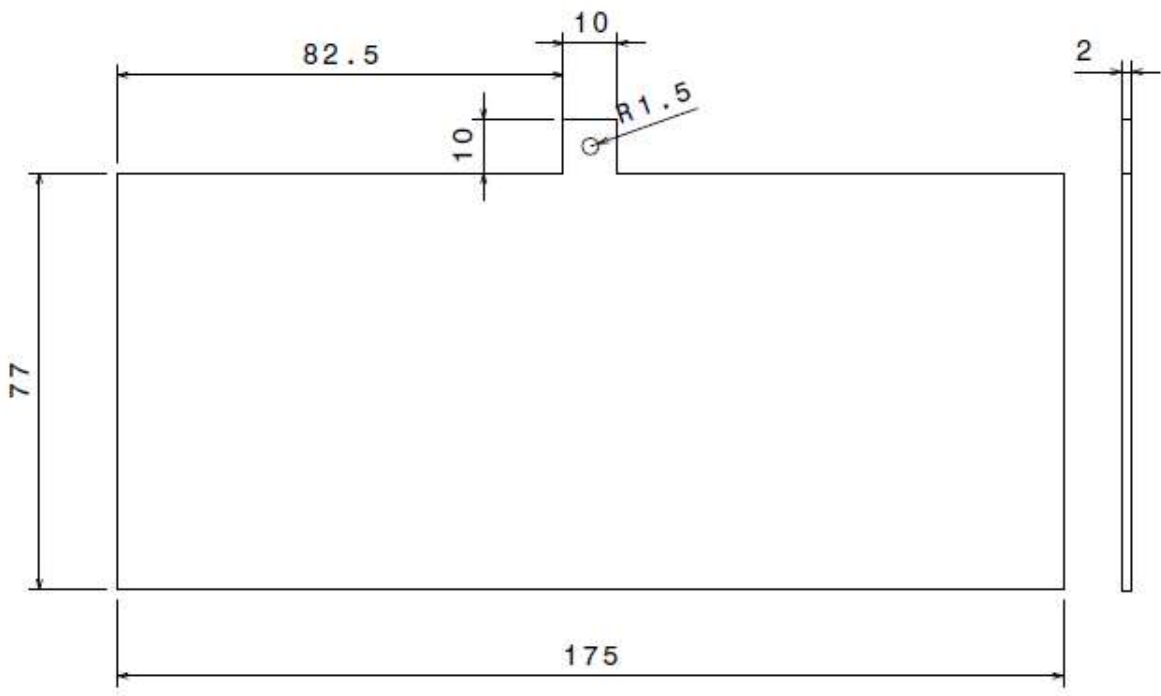
- Caja





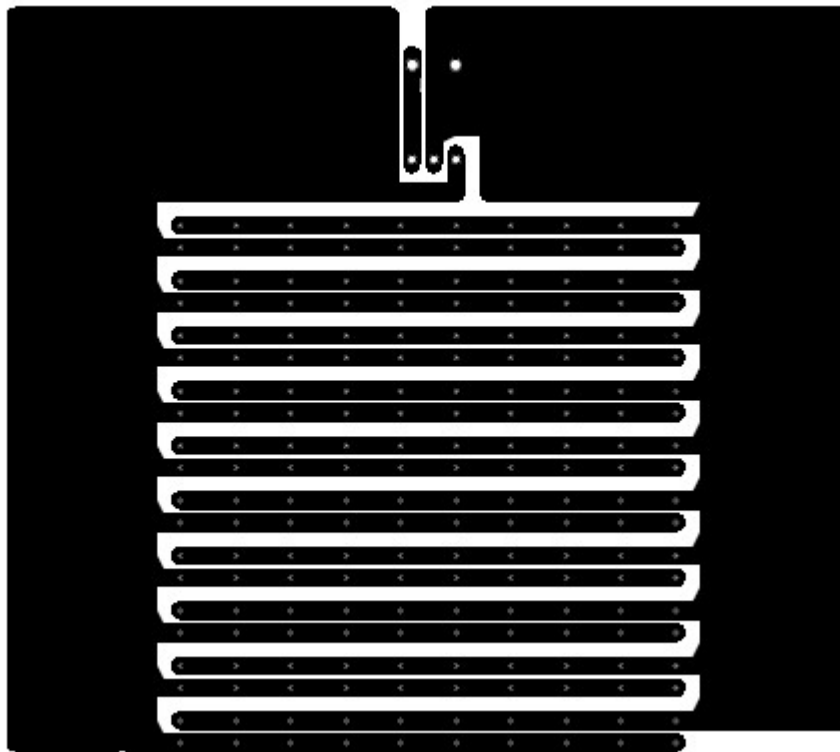


- Policarbonato

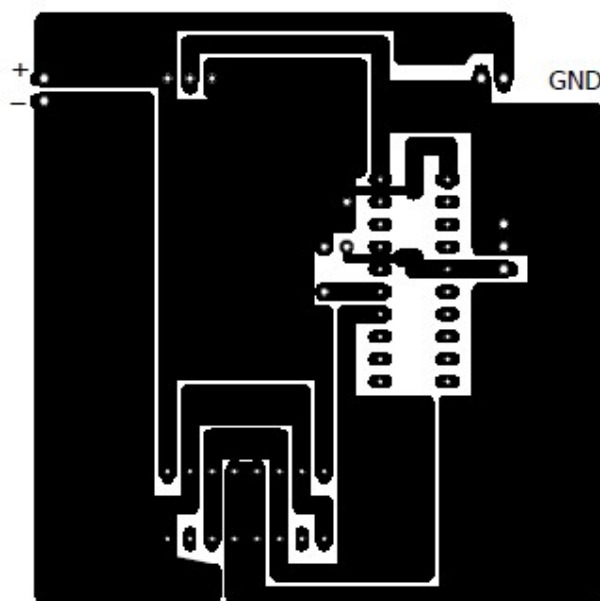


ANEXO IV: FOTOLITOS DE PLACAS

➤ PLACA DE LA INSOLADORA



➤ PLACA DEL TEMPORIZADOR



ANEXO V: CÓDIGOS DE PROGRAMACIÓN

➤ CÓDIGO DEL MICROCONTROLADOR

```
/*  
  Button  
  Turns on and off a light emitting diode(LED) connected to digital  
  pin 13, when pressing a pushbutton attached to pin 2.  
  The circuit:  
  * LED attached from pin 13 to ground  
  * pushbutton attached to pin 2 from +3.3V  
  * 10K resistor attached to pin 2 from ground  
  * Note: on most Arduinos there is already an LED on the board  
  attached to pin 13.  
  */  
  
// constants won't change. They're used here to  
// set pin numbers:  
const int entrada = P1_3;  // the number of the pushbutton pin  
const int salida = P1_6;   // the number of the LED pin  
// variables will change:  
int buttonState = 0;       // variable for reading the pushbutton status  
  
void setup() {  
  // initialize the LED pin as an output:  
  pinMode(salida, OUTPUT);  
  // initialize the pushbutton pin as an input:  
  pinMode(entrada, INPUT_PULLUP);  
}  
  
void loop(){  
  // read the state of the pushbutton value:  
  buttonState = digitalRead(entrada);  
  // check if the pushbutton is pressed.  
  // if it is, the buttonState is HIGH:  
  if (buttonState == HIGH) {  
    // turn LED on:  
    digitalWrite(salida, LOW);  
  }  
  else {
```

```
//turn LED off:
digitalWrite(salida, HIGH);
delay(20000); //microseconds
}
}
```

➤ CÓDIGO DE MATLAB PARA LAS GRÁFICAS DEL APARTADO 5.1

```
%Cálculo de altura de insolación
close all; clear all; clc
%Resultado experimento
y=[1:0.5:5 ]; %alturas
mA1=[110 95.8 79.3 65.6 54.9 46.5 39.4 33.4 28.3]; %medidas del
sensor 1 led
mA100=[109 104 100 96.5 93 90 87 85 83 81.1]; %medida del sensor
100 leds
PL_1=mA1/1000/0.18*100/2.4/2.4;
PL_100=mA100/1000/0.18*100/2.4/2.4;
figure(1); plot([y 9],PL_100,'-d',y, PL_1,'-o'); xlabel('Altura
(cm)'), ylabel('P_L (mW/cm^2)');
hold on;
figure(1); plot([0 9], [8.2851 8.2851])
%Nota: los puntos (1) de los mV DEBERÍAN COINCIDIR

y0=42.5; %obtenido de las gráficas
gamma=7.5*pi/180; %angulo de apertura de los leds
x0=62.15;
x0_b=x0+2*y0*tan(gamma);
beta_max=30;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Huella %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
beta=[0:beta_max]*pi/180;

%alcance de la huella;
xi=x0/2;
h=20; %altura led-PCB
y0=42.5;%altura led-cristal
y1=h.*cos(beta); x1=h.*sin(beta);
y2=xi.*sin(beta); x2=xi.*cos(beta); h1=h./cos(beta);
y3=y0+y2+h1-y1; x3=y3.*tan(gamma+beta); H_A=x1+x2+x3;
figure(5);plot(beta*180/pi,H_A,'r'); xlabel('\beta');ylabel('Huella
2 (mm)');title('Alcance de la Huella');

%longitud de la huella
y4=y0+h1-y1-y2; x4=y4.*tan(beta-gamma); Xh=x3+2*x2-x4;
figure(4);plot(beta*180/pi,Xh); xlabel('\beta');ylabel('Huella
(mm)');title('Longitud de la Huella');

dmax=x3./sin(beta+gamma); dmin=x4./sin(beta-gamma);
dmin2=y4./cos(beta-gamma);

figure(6); plot(beta*180/pi, dmax, beta*180/pi,
dmin,beta*180/pi,dmin2);
```